

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

доктор физико-математических наук
С. С. ВОЙТ,
доктор технических наук
Е. И. ЯНТОВСКИЙ

ББК 31

© Издательство «Наука», 1986 г.

И. А. НЕКРАСОВА

По оценкам разных авторов, доступная часть энергии Мирового океана, т. е. та часть, которая может быть практически использована при современном уровне техники преобразования, во много раз превышает уровень современного потребления энергии в мире, который определяется цифрой около $3 \cdot 10^{20}$ Дж в год (44,8 % от этой цифры покрываются нефтью; 32,4 — углем; 20 — газом; 2,8 % — энергией, вырабатываемой гидро- и атомными

станциями). Больше всего в океане тепловой энергии, поскольку океан — гигантский тепловой аккумулятор энергии Солнца.

Последнее десятилетие характеризуется определенными успехами в использовании тепловой энергии океана. Так, созданы установки мини-ОТЕС и ОТЕС-1 (ОТЕС — начальные буквы английских слов Ocean Thermal Energy Conversion, т. е. преобразование тепловой энергии океана — речь идет о преобразовании в электрическую энергию). Установка мини-ОТЕС смогла отдать в электрическую сеть 12—15 кВт, а на собственные нужды потребила около 35 кВт. Опыт, полученный при разработке и опытной эксплуатации установок мини-ОТЕС и ОТЕС-1, позволил приступить к проектированию тепловых океанских станций на сотни мегаватт.

Запасы энергии градиента солености, или осмоса (греч. «толчок», «давление»), по некоторым оценкам, не уступают тепловой энергии океана. Осмотическая энергия — наиболее «таинственный», т. е. наименее очевидный вид энергии океана, поскольку наши органы чувств эту энергию не воспринимают.

Энергия течений Мирового океана по величине близка к энергии, получаемой от сжигания всех видов топлива на Земле в течение года (примерно 10^{20} Дж). Начаты работы по использованию энергии Гольфстрима, самого мощного течения в Мировом океане. Предполагается использовать около 1 % его энергии. Авторы проекта считают, что эта цифра не должна заметно отразиться на общем балансе энергии течения.

По оценке Комиссии по экономии энергии и энергоресурсов Мировой энергетической конференции (МИРЭК), сегодня важным энергетическим ресурсом является биомасса, так как дает 10 % мирового потребления первичной энергии. Ожидается, что она будет играть такую же важную роль в будущем обеспечении энергией при выработке технологического тепла и производства синтетических топлив. Синтетическое топливо из биомассы можно сжигать на электростанциях, использовать на транспорте или в промышленности. Часть биомассы доставляет Мировой океан, предполагается, что доля океана в поставке биомассы будет возрастать. Рассматривается создание энергетических плантаций, для которых в океане имеются очень широкие возможности. По оптимистическим оценкам, углеводородное топливо из водорослей может производиться по цене, меньшей мировой рыночной цены на нефть.

Более трети поверхности Мирового океана (130 млн. км²) имеет дно, грунт которого пригоден для выращивания быстрорастущих водорослей, из которых можно легко получить горючие газы метан и этан, широко используемые для самых разных целей. В настоящее время обращено внимание на выращивание бурой водоросли — весьма урожайной культуры (от 600 до 1000 т с гектара в сыром весе). Бурая водоросль не имеет корней, поэтому для нее не очень важен состав грунта. Растет она в толще морской воды, но вода должна быть достаточно богата питательными солями и должно быть много солнца.

Имеются в Мировом океане и другие источники энергии. Например, обсуждался вопрос об использовании сероводорода — горючего газа с неплохой калорийностью. Сероводородом очень богато Черное море, и к тому же его количество там непрерывно возрастает. Есть сероводород и в других районах Мирового океана — общие запасы его очень велики (недостаток этого вида топлива — неприятный запах, но, возможно, будет найден способ его устранения).

Весьма перспективный вид энергии Мирового океана — это энергия волн. В океане много видов волн. Однако с точки зрения выработки электрической энергии заслуживают внимания лишь три их типа: приливные волны, ветровые волны и зыбь. Ветровые волны обладают большой разрушительной силой, т. е. несут значительную энергию. Несколько миллионов штормов ежегодно случается в Мировом океане. По подсчетам академика Н. В. Мельникова, 1 км² водной поверхности с волнами высотой около 5 м обладает мощностью около 3 млн. кВт. А штормовая погода может охватить площадь в несколько тысяч квадратных километров. Соответственно волновая мощность Мирового океана оценивается цифрой около 3 млрд. кВт! Запасы энергии ветровых волн и зыби огромны, но степень разработанности проблемы ее использования пока недостаточна, лишь в последнее десятилетие были сделаны некоторые шаги в деле практического использования энергии ветровых волн и зыби — для выработки электрической энергии.

Значительно раньше началось использование энергии приливных волн, отличающихся четкой регулярностью: два раза в сутки в определенное время появляются приливные волны заранее известной высоты. Эти свойства — строгая периодичность и определенная высота — позволили людям очень рано научиться использо-

вать их энергию: уже в XI в. строили мельницы, работающие за счет энергии прилива (например, во Франции в г. Шербуре до сих пор действует старая мельница, использующая энергию приливных волн). В наши дни приливные электростанции — самые мощные среди других волновых электростанций, но их можно построить не на любом участке побережья (и, как правило, не там, где особенно пужна энергия). У нас в стране, например, природа распорядилась так, что самые мощные приливы имеются вдали от промышленных центров или районов с большим потреблением энергии. В Советском Союзе самые мощные приливы — у берегов Камчатки, где общая энергия приливных волн равна примерно 10^{19} Дж в год.

Ветровые волны и зыбь хороши тем, что для использования их энергии не надо искать особых мест с благоприятными географическими условиями, как для приливных волн. Они бывают на любой акватории — был бы ветер да пространство для разгона. Чтобы утилизировать энергию ветровых волн (и зыби), не надо строить больших и дорогих плотин, что также очень важное преимущество. Именно поэтому в разных странах ведутся исследования по выбору наилучших способов преобразования энергии ветровых волн и зыби. Созданы волпоэнергетические установки разных мощностей, использующие различные физические принципы для преобразования энергии волн.

Почти полвека назад академик В. В. Шулейкин отметил три основных направления, по которым шла конструкторская мысль в решении проблемы использования энергии поверхностных волн¹. На одно из первых мест он ставил использование энергии качки: движение поплавка передается поршням насосов. Если учесть, что поплавок может иметь массу в сотни тонн, а размах колебательного движения принять порядка нескольких метров, то, очевидно, таким путем может быть получена весьма значительная мощность. Современные английские проекты использования волновой энергии («утка» Солтера и «плот» Коккереля) основываются именно на этом принципе. Второй способ — использование ударного давления: волны ударяют в подвижную деталь волновой машины и отдают ей свою кинетическую энергию. Этот принцип с успехом применялся в конце прошлого столетия в установках, использовавших энергию волн для накачки воды. Не потерял он своего значения и в наши

¹ См.: Шулейкин В. В. Физика моря. М.: ОНТИ, 1938, т. 2, с. 314.

дни (правда, для маломощных установок). Третий путь — использование гидравлического тарана. По этому способу была построена экспериментальная установка на станции Морского гидрофизического института АН СССР в Крыму. Ныне эта идея в большем масштабе реализуется на острове Маврикий и в других местах.

Различные виды энергии океана американский специалист Д. Д. Айзекс предложил условно оценивать одной мерой — в метрах водяного столба². Эта величина называется им плотностью потока, она характеризует степень концентрации данного вида энергии. С помощью этого понятия удобно сравнивать между собой различные виды энергии в океане. Например, для теплового градиента (т. е. разности температур между теплым и холодным слоями) 20°C плотность потока составляет 570 м водяного столба, ее напор — как в грандиозном водохранилище, подпертом плотиной высотой более полукилометра. А для градиента 12°C плотность потока равна 210 м. Обе цифры (210 и 570 м) рассчитаны с учетом КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно. Такую плотность потока в океане имеет еще только энергия градиента солености (осмоса) — 240 м. Другие виды энергии океана имеют значительно меньшие значения плотности потока. Так, для ветровых волн она составляет 1,5 м, а для океанских течений — лишь 0,05 м. Но, как сказал Д. Д. Айзекс, еще остаются неоткрытыми совершенно новые принципы, простые и сложные, обнаружив которые, можно использовать ресурсы океана, связанные с энергией, для блага человечества.

ПРИЛИВНЫЕ ВОЛНЫ

По всей Земле бегут приливные волны, последовательно поднимая и опуская различные участки земного шара. Воду и сушу. В разных местах высота приливного поднятия иная, да и время наступления другое. Общее лишь одно — на большинстве побережий две приливные волны каждые сутки. Точнее: основной период приливных волн равен половине лунных суток (т. е. 12 ч 25 мин), так что на прохождение двух волн требуется чуть больше суток.

В центральных районах океанов приливные волны малы, иногда высота их измеряется всего несколькими

² См.: Айзекс Д. Д. Тепловые, гидродинамические и химические источники энергии океана. — В кн.: Энергетические превращения в океане. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1981, с. 23.

сантиметрами³. Большой величины приливные волны достигают в некоторых окраинных районах океанов. При благоприятных очертаниях береговой линии и при условиях, обеспечивающих возникновение резонанса, приливные волны могут быть очень высокими. Дело в том, что приливные силы вызывают в основном горизонтальные смещения частиц воды. Их называют приливо-отливными течениями. В открытом океане скорость их мала, зато в узких проливах она может достигать 22 км/ч. Когда масса воды входит в устья рек или в заливы, вода там высоко поднимается. Самая большая высота приливных волн наблюдается в заливе Фэнди в Канаде — до 18 м. Такие волны высотой с многоэтажный дом несут большую энергию, которую можно использовать для выработки электроэнергии.

В Советском Союзе также есть районы с высокими приливами. Например, в Пенжинской губе Охотского моря высота приливных волн достигает 13,4 м, в Мезенской губе Белого моря на реке Семже — 9 м. Есть большие приливы и в других местах побережья нашей страны. По запасам приливной энергии Советский Союз стоит на одном из первых мест в мире.

Силу прилива люди начали использовать в приливных мельницах, которые строились еще в XI в. на побережье Англии и в средние века во Франции, Канаде, русском Беломорье. В наше время энергия приливных волн преобразуется в электрическую на четырех приливных электростанциях (ПЭС): промышленной Ранс, построенной во Франции в 1967 г., и на трех опытных (СССР — Кислогубская, 1968 г.; КНР — Цзянси, 1981—1983 гг.; Канада — Аннаполис, 1984 г.). Общая мощность их составляет 261 тыс. кВт, в то время как возможная к использованию мощность приливных электростанций на всех побережьях планеты оценивается цифрой около 600 млн. кВт.

Чем же объяснить такое положение, представляющееся парадоксальным в условиях недостатка в электроэнергетики, когда человечество подходит к истощению запасов органического топлива, а энергия рек в значительной степени уже использована? Причина прежде всего в том, что энергия прилива оказывается более дорогой и на первый взгляд менее удобной, чем энергия рек.

³ Для изучения приливных волн в океане применяются автономные мареографы — приборы высокой чувствительности, созданные на основе пьезокварцевых преобразователей давления.

Если на побережье приливного моря отгородить дамбой залив (бассейн) и поставить в ней турбину, то во время прилива и отлива турбина под напором воды начнет вращаться и вырабатывать энергию. Но напор этот невелик по сравнению с тем, который может быть получен с помощью плотин на речных ГЭС. Он составляет лишь часть высоты прилива — не более 2—10 м. Для получения достаточно большой мощности необходима установка одновременно многих турбин, что ведет к удорожанию энергии. Кроме того, мощность приливных электростанций колеблется ввиду изменения величины прилива от новолуния к полнолуннию, а в течение суток она прерывиста из-за смены прилива отливом.

За последние десятилетия было предложено много остроумных способов преодоления этого недостатка. Французский гидротехник Белидор еще в XVIII в. высказал идею о разделении бассейна на две части с помощью плотины, в которой устанавливается колесо приливной мельницы; таким путем обеспечивается ее непрерывная работа. На основе этой идеи до сих пор разрабатываются многобассейновые схемы ПЭС, в которых устраивается уже не одна, а несколько плотин с установкой в каждой из них дублирующих турбин.

Однако советский специалист Л. Б. Бернштейн показал неэкономичность и неэффективность подобных схем⁴. Они не могут преодолеть внутримесячного неравенства прилива, приводящего к уменьшению мощности в течение недели в 9 раз. Непрерывность генерирования энергии достигается дорогой ценой: дополнительные плотины уменьшают полезную площадь бассейна, а следовательно, и энергию. Требуется установка дополнительных турбин в специально для этого построенных гидроаккумулирующих электростанциях. Таким образом, не сама приливная энергия, а неправильные способы ее использования являются причиной неэкономичности ПЭС. Л. Б. Бернштейн выдвинул альтернативную модель решения проблемы, в которой реализуются положительные качества приливной энергии, необходимые для современной энергетики.

Дело в том, что среднемесячная величина приливной энергии неизменна, т. е. не зависит от водности года и сезона. Поэтому включение приливной электростанции

⁴ См.: Бернштейн Л. Б. Приливные электростанции в современной энергетике. М.: Госэнергоиздат, 1961.

в энергосистему благотворно скажется на режиме участвующих в этой системе электростанций других типов. С другой стороны, поскольку современное энергопотребление проходит волнообразно (днем больше, ночью меньше), нет необходимости выравнивать волны приливной энергии — задача заключается лишь в том, чтобы совместить эти волны с волнами потребления. Проблему можно решить, если на ПЭС установить обратимый гидроагрегат. В почные часы избыточной энергии он обращается в насос и закачивает воду из моря в бассейн ПЭС, выше уровня полной воды. Создается запас воды, который турбина ПЭС использует для выработки энергии в дневные часы повышенного потребления, позволяя при этом тепловым электростанциям работать в наиболее выгодном для них равномерном режиме. Участвующие же в объединении речные ГЭС с большими водохранилищами могут компенсировать уменьшение мощности приливных электростанций в период слабых приливов за счет воды, сэкономленной в этих водохранилищах во время высоких приливов. Так создается гармоничная система, в которой приливные электростанции не только сами используются наиболее эффективно, но позволяют электростанциям других типов работать в наиболее выгодном для них режиме.

Для осуществления этой модели нет необходимости создавать дорогостоящие многобассейновые приливные электростанции и строить дублирующие гидроаккумулирующие электростанции. Приливную энергию нужно использовать в наиболее простых и дешевых однобассейновых установках, дающих наибольшее количество энергии. А потом направлять пульсирующие, прерывистые, но неизменно гарантированные потоки в объединенные энергосистемы. Для такого решения необходимо, чтобы эти системы имели достаточные размеры с охватом целых стран и даже континентов, с участием речных ГЭС с большими водохранилищами. Мощные однобассейновые приливные электростанции, построенные на берегах Ла-Манша, заливов Фанди, Сан Хосе, Мезенском и других, могли бы гармонично сочетаться с тепловыми (угольными и атомными) и речными ГЭС, что помогло бы эффективно решить проблему энергоснабжения в часы пикового потребления регионов Западной Европы, Центра СССР, Северной и Южной Америки и других стран, берега которых омываются морями с высокими приливами.

Сооружение приливной электростанции Ранс, на которой были установлены 24 обратимых приливных гидро-

агрегата, казалось бы, доказало возможность такого решения. Но возник барьер стоимости: строительство этой станции оказалось в 2,5 раза дороже сопоставимых речных ГЭС.

В поиске путей преодоления этого барьера Л. Б. Бернштейн нашел новое решение: на Кислогубской ПЭС наплавное здание приливной электростанции было построено в доке на берегу, а затем отбуксировано по воде на исходную позицию и опущено на заранее подготовленное насыпное основание, т. е. были устранены сложности, связанные с возведением в море временных перемычек. При строительстве станции Ранс сооружение перемычек вылилось в очень сложную проблему, и был период, когда оно поставило под угрозу осуществление всего проекта.

Применение наплавных конструкций в проектах мощных приливных электростанций в Канаде, Великобритании, Австралии, Индии и других странах позволило снизить стоимость их сооружения на 25—30 %. Модель глобального использования энергии однобассейновых ПЭС позволила экономически обосновать проекты приливных электростанций: Камберленд мощностью 1 млн. кВт, Кобекуид — 4 млн. кВт, Северн — 7,2 млн. кВт и др.

В СССР исследуется сооружение Мезенской ПЭС мощностью 15 млн. кВт, Тугурской — 6 млн. кВт и Пенжинской — 30—100 млн. кВт. В двенадцатой пятилетке намечается сооружение опытно-промышленной Кольской ПЭС мощностью 38 тыс. кВт, которая, действуя совместно с речной ГЭС, явится моделью работы Мезенской ПЭС в объединении энергосистем Европейской части СССР.

Так, приливная энергия, имеющая относительно небольшой энергопотенциал в сравнении с другими источниками энергии океана, может стать важным компонентом энергоснабжения.

ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ И ЗЫБЬ

В августе 1826 г. капитан Дюрвиль наблюдал в Индийском океане чудовищные волны высотой около 30 м. Однако его рассказ об этом был встречен с недоверием. Известный физик того времени Араго выступил с категорическим опровержением, соглашаясь самое большее на 7 м. Вскоре Дюрвиль снова отправился в путешествие, а по возвращении сообщил о встрече с волнами одиннадцатиметровой высоты. Но и это его сообщение было встре-

чено с недоверием. . . За полтораста с лишним лет, прошедших с тех пор, было много дискуссий на тему о максимально возможной высоте ветровых волн.

Ветровыми волнами называются поверхностные волны, вызванные ветром и находящиеся под его динамическим воздействием. Когда ветер прекращается, на воде остается зыбь, высота которой постепенно уменьшается. Высотой волны или зыби называется расстояние по вертикали, которое отделяет впадину от гребня. Специалисты ценят зыбь за ее высокую энергию. Вспомним, как иной раз гулко бьет о морской берег зыбь при полном безветрии.

Но иногда волны и зыбь наблюдаются одновременно. Причем нередко они имеют разные направления распространения. В таком случае зыбь обычно является отголоском шторма, прошедшего где-то в стороне. Известны обширные районы, где наблюдается подобное смешанное волнение. Например, такой район отмечен на картах в северной части Тихого океана. Здесь трудно плавать малым судам. Длиннопериодная зыбь может проходить по океану с большой скоростью значительные расстояния, порядка нескольких тысяч километров. Одно время появление длиннопериодной зыби использовали для прогнозирования приближения шторма.

С точки зрения волновой энергетики наличие на поверхности океана одновременно двух систем колебаний, распространяющихся в разных направлениях, нежелательно, так как может снизить коэффициент полезного действия волноэнергетической установки. Для лучшего использования энергии волн установка должна быть развернута по направлению приходящих волн. Или, точнее, ее приемники энергии должны располагаться по нормали к направлению распространения волн. Но это условие нельзя выполнить, если волны или зыбь одновременно подходят с разных направлений. Поэтому хорошим может считаться только такое место для размещения волноэнергетической установки, где волны подходят преимущественно с одного направления.

Первая теория поверхностных волн была предложена Герстнером в 1802 г. Но она ничего не говорила о максимально возможной высоте волн. Еще в 1952 г. некоторые специалисты считали, что волны выше 7 м редки, а волны больше 10 м не существуют. Однако время показало, что Дюрвиль был прав. Вот фраза из современного научного издания: «При экстремальных скоростях ветра в этом районе порядка 50 м/с здесь достигаются рекордные вы-

соты волн около 30 м и длины в сотни метров»⁵. Речь идет о знаменитых «ревущих широтах» Южного полушария. Есть сообщение о еще более высоких волнах. Например, в журнале «Морской флот» в первом номере за 1980 г. написано следующее: «В Тихом океане волна, измеренная с борта американского танкера „Рамано“ 7 февраля 1933 г. на переходе из Манилы в Сан-Диего, достигала высоты 36 м».

Есть и более свежие данные: «В зоне „ревущих сороковых широт“ Южного полушария при штормовом ветре (35 м/с) одна из советских антарктических экспедиций наблюдала волны, достигающие высоты около 30 м. Размер волн был определен с помощью стереофото съемки поверхности моря. . .»⁶.

Три свидетельства, не оставляющие сомнений в реальности волн высотой 30 м. Но все же и в наше время данных о больших волнах мало. Например, трудно получить точный ответ на простой вопрос: каков был период названных выше рекордных волн? И на многие другие подобные вопросы. Почему возникло такое положение?

Во все времена мореплаватели опасались бурных волн. Опасаются и теперь. Капитаны попросту предпочитают обходить стороной опасные районы. А они есть не только в «ревущих» сороковых широтах Южного полушария. Со времен парусного флота идет дурная слава о некоторых районах Индийского океана. Там ходят гороподобные волны-убийцы (кейп-роллеры), встреча с которыми грозит бедой вполне современному судну.

Современная техника позволяет получить необходимую информацию о волнах без риска для людей и судов минимум двумя способами. Самый современный — с помощью спутников. Микроволновой радиолокатор, установленный на спутнике, способен дать необходимую информацию о высоте волн на поверхности океана. Более «старый», но вполне надежный способ — с помощью волнографов открытого моря, приборов для измерения высоты волн, использующихся на научно-исследовательских судах. Судно спускает буюк, к которому прикреплен кабель-трос, а на его нижнем конце крепится датчик гидростатического давления. Кабель-трос берется достаточно длинным (половина длины поверхностной волны). При выпол-

⁵ Физика океана. Гидродинамика океана. М.: Наука, 1978, т. 2, с. 146. (Океанология).

⁶ Гусев А. М. Основы океанологии. М.: Изд-во МГУ, 1983, с. 156.

конии этого условия буюк, плавающий на поверхности, протаскивает в глубине датчик давления, показания которого пропорциональны высоте волн. Если поверхностный буй снабдить радиопередатчиком, несущую частоту которого промодулировать сигналами датчика давления, то таким путем можно легко получить необходимую информацию о высоте волн в районе, где будет плавать подобное устройство. Разработаны и более совершенные проволочные волнографы.

Запасы волновой энергии огромны, но степень разработанности проблемы ее использования пока недостаточна.

Энергия волн, или волновой поток Мирового океана, оценивается Д. Д. Айзексом в 10^{21} Дж, а плотность потока — в 1,5 м. Расчет сделан им для волн с периодом 8 с и средней длиной приблизительно 20 м. По его ориентировочной оценке, запаса волновой энергии хватит для покрытия потребности всего мира в 2050 г., а может быть, и на весь XXI век. Дело в том, что энергия поверхностных волн обладает очень важным свойством возобновляемости.

Предположим, что в открытом море выставлена цепочка преобразователей энергии волн. Пусть они работают столь эффективно, что подходящие к ним волны полностью поглощаются, т. е. имеет место КПД преобразования 100 %. Тогда за линией преобразователей образуется свободное от волн пространство воды. Но не надо. Ветер вскоре вновь образует там волны. А когда волны достигнут прежней величины, можно установить второй ряд преобразователей и снова получать энергию. В этом заключается одна из важных особенностей энергетики ветровых волн.

Необходимо, однако, помнить, что при подобном многократном использовании энергии волнового поля на каждый новый разгон волн требуется достаточно большое свободное водное пространство. Поэтому вычисление энергетических ресурсов данной акватории по ее площади и средней высоте волн, как это обычно делается, не может дать полностью правильного представления о величине реальной энергии, которая может быть здесь получена⁷.

См.: Сичкарев В. И. Волноэнергетические ресурсы и их использование. — В кн.: Методы преобразования энергии океана. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1983, с. 72.

Доля реального съема волновой энергии определяется по формуле

$$\eta_{\lambda} = \lambda/x,$$

где λ — длина волны; x — расстояние между рядами волновых станций, равное расстоянию, необходимому для разгона волн.

Например, при $\lambda=120$ м; $x=500$ км, $\eta_{\lambda}=0,00024$. Это означает, что только 0,024 % полной энергии волн, имеющих в данном бассейне, могут быть практически использованы при принятом значении x . Отсюда следует важность правильного выбора этой величины и необходимость оптимизации значения η_{λ} .

Ветровые волны с достаточной энергией часто наблюдаются в прибрежной полосе стран, нуждающихся в электроэнергии. Ветровые волны и зыбь удобны тем, что для использования их энергии обычно не надо искать специальных мест с особо благоприятными географическими условиями, как для приливных. Они бывают на любой акватории. Чтобы утилизировать энергию ветровых волн (и зыби), не надо строить больших и дорогих плотин. Это также очень важное преимущество.

История развития использования волновой энергии началась в 80-х годах прошлого столетия. Однако до сих пор в этой области нет единства технических решений, как, например, в использовании приливной или тепловой энергии океана. Во многих странах широким фронтом идут экспериментальные и теоретические исследования с целью найти оптимальный метод преобразования.

Опасность больших волн для мореплавателей связана с их большой энергией. Однако с точки зрения энергетиков большая энергия — важная положительная особенность в деле преобразования энергии волн в электрическую энергию. Ветровые волны считаются очень энергоемкими образованиями. Но одновременно есть мнение об их низкой потенциальности как источников энергии и обсуждаются методы увеличения ее концентрации. Концентрация волновой энергии желательна для повышения снимаемой мощности при неизменных размерах преобразователя. Познакомимся с практическими диффрами, характеризующими мощность океанских волн.

Мощность волны на единицу длины ее фронта определяется формулой

$$N = \frac{1}{8} \frac{\rho g h^2 \lambda}{T_{\lambda}}, \quad (1)$$

где ρ — плотность воды, кг/м^3 ; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; h — высота волны, м ; λ — длина волны, м ; T_λ — период волны, с .

По данным натурных исследований известно, что для развитого волнения характерные длины волн колеблются в пределах 60—600 м, периоды волн изменяются в пределах 5—20 с, а высота волны — в диапазоне от 2 до 20 м; все эти данные относятся к типичной для океана скорости ветра (V_v) 20—30 м/с. При этом имеют место следующие соотношения:

$$h_\lambda \approx 0,2 V_v^2 / g, \quad (2)$$

$$\lambda \approx 2\pi V_v^2 / g, \quad (3)$$

$$T \approx 2\pi V_v / g. \quad (4)$$

Из формулы (2) найдем скорость ветра

$$V_v \approx \sqrt{5gh_\lambda}.$$

Подставив полученное значение в формулы (3) и (4), получим

$$\lambda \approx 10\pi h_\lambda,$$

$$T_\lambda \approx 2\pi \sqrt{5h/g}.$$

Подставив полученные значения T_λ и λ в формулу (1), получим

$$N_\lambda \approx 0,3\rho g^{3/2} h_\lambda^{5/2},$$

где N — мощность волны (в ваттах) на 1 м длины фронта.

Учитывая, что плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g^{3/2} = 30,8$, можно окончательно написать

$$N_\lambda \approx 10^4 h_\lambda^{5/2} \text{ Вт/м}. \quad (5)$$

Вычислим по этой формуле мощность 1 м по фронту для рекордной волны высотой 36 м:

$$N_\lambda \approx 10^4 36^{5/2} = 3,3 \cdot 10^8 \text{ Вт} = 70 \text{ МВт}.$$

70 МВт — это мощность районной электростанции. Таковую волну никак не назовешь низкопотенциальным источником энергии. Совершенно очевидно, что здесь не требуется концентрации энергии, скорее, наоборот. Но подобные волны редки, и они бывают слишком далеко от мест потребления электрической энергии — на них нельзя базировать энергетику. Кроме того, полученная

цифра несколько завышена, поскольку для подсчета энергии мы воспользовались закономерностями (2), (3) и (4), установленными для волн длиной не более 20 м. Для северо-западной части Тихого океана, где средняя высота волн примерно 1,25 м, мощность составит примерно 75 кВт/м. Такого же порядка мощность ветровых волн у побережья Англии (волновой режим в этом районе служит предметом тщательного изучения английских специалистов). В Атлантическом океане средняя мощность волн за год равна 100 кВт/м фронта. Но зимой она значительно выше, так, например, на станции «Индия» (в 400 км от побережья Великобритании в сторону Исландии) достигает 600 кВт/м, а в сильные штормы — до 5 МВт/м.

Мощность волн заметно падает при их приближении к берегам, т. е. к местам, удобным для размещения силовых установок. Интересны результаты измерения средней годовой мощности волн в трех точках вблизи берега, проведенные Национальной инженерной лабораторией Великобритании:

	№ 1	№ 2	№ 3
Глубина, м	44	20—25	15
Расстояние от берега, км	20	6	4
Мощность волн, кВт/м	48	32	17

Мощность электрической энергии, которую можно получить от свободной энергии волн, зависит от коэффициента полезного действия преобразователя. Теоретически КПД может быть очень высок — до 100 %. Однако в процессе преобразования может теряться до 60—80 % свободной энергии. КПД, равный 40 %, считается очень высоким и трудно достижимым, более реально получение КПД, равного 20—25 %. Хороший преобразователь, расположенный в удачном месте с достаточной глубиной, способен обеспечить немногим более 15 кВт/м, а ближе к берегу 5—10 кВт/м.

Положительная особенность волновой энергетики заключается в том, что в осенне-зимний период (шесть месяцев в году), когда особенно пужна электроэнергия, средняя мощность увеличивается и может при благоприятных условиях достигать 25 кВт/м.

Из-за значительного затухания энергии волн при приближении к мелководью мощные энергетические центры будущего предполагается ставить в достаточном удалении от берегов, не ближе 30 км, возможно до 80 км. Именно

В таком удалении намечено строительство в Великобритании энерговолновых установок на мощность 2 тыс. МВт. Стоимость электроэнергии подобных мощных установок должна составлять 5,15 пенса за 1 кВт-ч. Есть и более оптимистические оценки — 3-4 пенса за 1 кВт-ч, что соответствует современной цене на электрическую энергию, производимую атомными и угольными станциями в Англии.

ОКЕАН — АККУМУЛЯТОР ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Мировой океан — гигантский аккумулятор энергии Солнца. Какова же емкость этого аккумулятора? Оценка различных авторов количества тепловой энергии Мирового океана расходится иногда на несколько порядков. Например, американский специалист Д. Д. Айзекс оценивает энергию градиента температур в океане цифрой 10^{21} Дж, а советский специалист Е. Н. Малявин — $7,5 \cdot 10^{23}$ Дж⁸, поясняя, что речь идет о доступной энергии, т. е. об энергии, которую можно получить из океана при разности температур 20 °С с помощью современных преобразователей. Отмечается, что запасов тепловой энергии океана хватит на тысячу лет, даже если считать ее расход по уровню потребления XXI века. Потребление энергии во втором десятилетии XXI в. оценивается цифрой порядка $2,8 \cdot 10^5$ млрд. кВт-ч.

Возникает вопрос: насколько допустимо подобное изъятие энергии тепла из океана? Ведь изъятие части тепла из поверхностного слоя и за счет подъема на поверхность больших количеств холодной воды из глубин приведет к охлаждению поверхностных вод океана, и он будет меньше отдавать тепла в атмосферу. Как это скажется на климате континентов? Вопрос сложный, на который вряд ли кто может дать однозначный ответ в настоящее время.

В. А. Акуличев и А. К. Ильин поставили вопрос иначе: сколько можно взять энергии из океана без вреда для окружающей среды⁹? В качестве критерия они приняли допустимое понижение температуры поверхности океана

⁸ Энергетические превращения в океане. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1981, с. 23, 51.

⁹ См.: Акуличев В. А., Ильин А. К. Тепловые энергетические ресурсы тропических районов Мирового океана. — В кн.: Преобразование тепловой энергии океана. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1984, с. 3.

на 0,5 К. Расчет сделан для перемешанного слоя вод тропической части Мирового океана в связи с использованием его энергии станциями ОТЕС. Цифра 0,5 К принята на том основании, что она близка к флуктуациям средней температуры, наблюдающимся под влиянием естественных причин. Как известно, они не превосходят нескольких десятых долей градуса. Тогда максимально допустимая мощность, которую можно снять в тропической зоне Мирового океана, составит 11 млрд. кВт. При непрерывной работе тепловых преобразователей за год такой мощностью будет выработано $0,96 \cdot 10^5$ млрд. кВт-ч, или $3,4 \cdot 10^{20}$ Дж. Цифра эта примерно втрое меньше потребления энергии, прогнозируемого на 2020 г.

Есть и другие причины, ограничивающие использование тепловой энергии Мирового океана. Речь идет о значительном выделении углекислого газа (CO_2) из глубинных холодных вод, которые должны подниматься в больших количествах на поверхность для работы тепловых преобразователей. Из-за снижения давления и повышения температуры этих вод при подъеме на поверхность из них будет выделяться растворенная углекислота. Кроме выделения углекислоты могут наблюдаться и другие нежелательные явления, связанные с гидродинамическими и тепловыми эффектами в океане, а также с возможными утечками рабочих жидкостей, т. е. аммиака, фреона или ядовитых веществ, необходимых для промывки теплообменников, например хлора. Все это свидетельствует о том, что вопрос об оптимальной величине съема тепловой энергии и местах наилучшего размещения станций ОТЕС достаточно сложен и нуждается в тщательном изучении.

Как происходит зарядка океана солнечным теплом? Лучи Солнца падают на него сверху. Но вспомним, что если спиральный электронагреватель опустить в стакан с холодной водой, в его верхнюю часть, то вода сверху закипает, а внизу остается холодной; объясняется это малой теплопроводностью воды. Как же океан прогревается на десятки и сотни метров в глубину? Может быть, солнечные лучи способны далеко проникать в толщу воды?

Нет, такой способностью световые лучи не обладают. 60% светового потока поглощается в первом метре водяной толщи. Ослабление идет по экспоненциальному закону с достаточно большим показателем степени. В результате действия этого закона на глубине в 100 м уже сумерки в полдень, когда на поверхности глаза режет от яркого солнца. На протяжении 100 м освещенность сни-

жается от 100 тыс. до нескольких люкс. И это происходит в относительно прозрачных водах центральной части Черного моря. На глубинах в 500—600 м остатки солнечного света можно обнаружить только с помощью чувствительного фотоумножителя. Там — область вечного мрака.

Следует заметить, что светотехнические единицы (люксы) мало пригодны для измерений в воде, лучше пользоваться энергетическими, оценивая интенсивность излучения в ваттах на квадратный сантиметр. Дело в том, что морская вода — избирательный фильтр. Она плохо пропускает длинноволновые лучи Солнца и гораздо лучше — коротковолновые. Например, если опускать в воду какой-нибудь красный предмет, скажем, диск, то он перестанет быть видимым гораздо раньше, чем белый. А перед исчезновением «побелеет». Что же касается инфракрасных лучей, то они поглощаются в воде практически полностью после прохождения слоя толщиной 3—4 м.

Но на эти лучи приходится основная часть энергии в спектре излучения Солнца. Как же тогда прогревается океан? Благодаря перемешиванию путем турбулентности и конвекции. Если перемешивания не будет, Солнце нагреет лишь тонкую поверхностную пленку воды и тепло не будет запасаться в достаточном количестве. Прекратится «центральное отопление» планеты, Земля замерзнет. К счастью, этого не происходит. Турбулентность исправно работает, тщательно перемешивая воды Мирового океана в поверхностном слое, а глубже эстафету по переносу тепла принимает конвекция. Это сложный и еще недостаточно исследованный процесс.

Исключительную роль в перемешивании имеет соленость вод Мирового океана. За счет испарения воды с поверхности соленость в поверхностном слое возрастает. Но более соленая вода — более тяжелая, поэтому она опускается вниз, на глубину, несмотря на то, что она теплая. Целые «пласты» более соленой воды тонут, освобождая место на поверхности для менее соленой. Такие пласты называются термиками.

Лабораторные исследования показали, что процесс погружения пласта соленой воды имеет конвективный характер, при этом наблюдается «иерархия»: соленый пласт (термик) не сразу опускается до конечной глубины. Погружение идет поэтапно. Например, по данным опытов Фостера, термики сначала погружаются на несколько сантиметров под поверхность океана, где они зародились.

Это — первый этап. А на втором этапе они погружаются сразу на целый метр.

Имеется еще один вид конвекции — проникающая. В этом случае струи тяжелой воды прямо с поверхности идут далеко в глубину. Такое интенсивное и мало изученное явление (его иногда называют образованием «колодцев») наблюдалось, например, на Средиземном море.

В результате действия этих факторов верхний слой океана обычно хорошо перемешан. Он так и называется — перемешанный. Толщина его зависит от времени года, силы ветра и географического района. Например, летом в штиль толщина перемешанного слоя на Черном море всего 20—30 м. А в Тихом океане близ экватора был обнаружен (экспедицией на научно-исследовательском судне «Дмитрий Менделеев») перемешанный слой толщиной около 700 м. От поверхности до глубины в 700 м располагался слой теплой и прозрачной воды с температурой около 27 °С. Этот район Тихого океана по своим гидрофизическим свойствам похож на Саргассово море в Атлантическом океане. Зимой на Черном море перемешанный слой в 3—4 раза толще летнего, его глубина доходит до 100—120 м. Столь большая разница объясняется интенсивным перемешиванием в зимнее время: чем сильнее ветер, тем больше волнение на поверхности и сильнее идет перемешивание. Такой слой скачка называют еще сезонным, поскольку глубина залегания слоя зависит от сезона года.

Особенно сильное перемешивание наблюдается в океане при прохождении тайфунов. Но такие события случаются не так уж часто.

Океан устойчиво стратифицирован, как говорят гидрофизики. Именно благодаря этому верхние слои воды океана могут служить для нагрева рабочей жидкости в тепловых преобразователях, использующих его энергию. Тайфуны — серьезный враг системы ОТЕС. Прохождение урагана через район дрейфа станции ОТЕС нарушит ее работу. Возникает ситуация, как если бы на обычную ТЭЦ вдруг прекратился подвоз топлива — чрезвычайное происшествие, с вероятностью возникновения которого придется считаться при выборе места установки системы.

Глубже перемешанного слоя в океане находится слой скачка температуры, ограничивающий перемешанный слой снизу. На некоторой глубине температура воды резко уменьшается, это и есть начало слоя скачка. До него, считая от поверхности, температура воды с увеличением

глубины почти не изменялась, как и надлежит быть в перемешанном слое. Почему так происходит? Слабеет действие перемешивающих сил с глубиной. В слое скачка наблюдается резкое изменение температуры — на несколько градусов на протяжении нескольких метров по вертикали. Глубже слоя скачка температура воды с глубиной продолжает падать, но не так быстро, как в самом слое. Одновременно со скачком температуры наблюдается и скачок плотности морской воды.

Слой скачка играет исключительную роль в физике и биологии океана. Важен он и во многих аспектах человеческой деятельности, связанных с океаном. Благодаря высокому градиенту плотности слой скачка выполняет своеобразную роль «жидкого грунта». Этим свойством широко пользуются многочисленные обитатели океана. Без затраты мускульной энергии они могут долго оставаться в слое скачка во взвешенном состоянии. Да и подводные лодки могут в нем «полежать» в случае необходимости, а находясь под ним, они защищены от обнаружения лучами гидролокаторов. Слой скачка — экран для акустических колебаний. Наличие слоя скачка температуры важно и с точки зрения использования тепловой энергии океана. Слой скачка — граница или, точнее, узкая пограничная область между теплой водой перемешанного слоя и значительно более холодными водами главного термоклина, лежащими ниже слоя скачка.

Возникновение перемешанного слоя обязано турбулентным пульсациям скорости. Там, где они ослабли, образовался слой скачка. Но он представляет собой препятствие для пульсаций скорости, действует как экран. Как показывают осциллограммы, сразу под слоем скачка пульсаций скорости практически нет.

Интересный парадокс: пульсации скорости содействовали образованию слоя скачка, а он, образовавшись, их через себя не пропускает глубже. Возможно, отчасти благодаря этому явлению нижняя граница теплого перемешанного слоя обычно проходит достаточно четко. Что же касается турбулентных пульсаций скорости, то их можно найти значительно глубже расположения слоя скачка, но появление их там вызвано другими причинами.

Слой скачка — обязательное условие наличия теплого перемешанного слоя. Поэтому очень важно, чтобы мощные водяные потоки станций ОТЕС его не разрушили; не исключено, что для этого придется далеко разносить места сброса отработанных вод и забора теплой воды.

ЭНЕРГИЯ ГРАДИЕНТА СОЛЕННОСТИ

Известно несколько способов преобразования энергии градиента солёности в электроэнергию. Наиболее перспективный на сегодня — преобразование с помощью осмоса, поэтому часто говорят об энергии градиента солёности как об энергии осмоса. Но принципиально возможны и другие способы преобразования энергии градиента солёности.

Явление осмоса заключается в следующем. Если взять полупроницаемую мембрану (перепонку) и поместить ее в качестве перегородки в каком-либо сосуде между пресной и соленой водой, то осмотические силы начнут как бы перекачивать пресную воду в соленую. Молекулы пресной воды будут переходить через разделительную мембрану во вторую половину сосуда, заполненную соленой водой, а молекулы соли мембрана не будет пропускать в первую половину с пресной водой. За это свойство мембрана и называется полупроницаемой. Выделяющаяся при этом процессе энергия проявляется в виде повышенного давления, возникающего в части сосуда с соленой водой. Это — осмотическое давление (иногда называют осмотическим водопадом). Максимальное значение осмотического давления — разность давлений между раствором (т. е. соленой водой) и растворителем (т. е. пресной водой), при которой осмос прекращается, что происходит из-за образования равенства давлений по обе стороны полупроницаемой мембраны. Образовавшееся повышенное давление в половине сосуда с соленой водой уравнивает осмотические силы, вытеснявшие молекулы пресной воды через полупроницаемую мембрану в соленую воду.

Явление осмоса известно давно. Впервые его наблюдал А. Полло в 1748 г., но детальное изучение началось более столетия спустя. В 1877 г. В. Пфеффер впервые измерил осмотическое давление при изучении водных растворов тростникового сахара. В 1887 г. Вант-Гофф на основе данных опытов Пфеффера установил закон, определяющий осмотическое давление в зависимости от концентрации растворенного вещества и температуры. Он показал, что осмотическое давление раствора численно равно давлению, которое оказали бы молекулы растворенного вещества, если бы находились в газообразном состоянии при тех же значениях температуры и концентрации. Приближенное уравнение для определения осмотического

давления имеет вид

$$\pi_0 = i \frac{c}{M} RT,$$

где π_0 — осмотическое давление, Па; i — изотонический коэффициент, определяющий степень диссоциации молекул растворенной соли; c — концентрация раствора, г/м³; M — молекулярная масса (для NaCl $M=58$ г); R — универсальная газовая постоянная, Дж/моль К; T — абсолютная температура раствора.

Примем среднюю соленость воды океана 35‰, т. е. 35000 г/м³, $i=1,65$, $R=8$ Дж/моль К, $T=300$ К. Осмотическое давление такого раствора $\pi_0=2\,389\,464$ Па, т. е. примерно 24 атм. Следовательно, в условиях средней солености океана возможно образование осмотического водопада высотой около 240 м. Полупроницаемая мембрана как бы создает для раствора водохранилище, подпертое плотиной высотой 240 м. Точнее, она сама играет одновременно роль такой плотины и насоса, накачивающего воду. При более высокой концентрации растворенной соли осмотическое давление будет еще выше. Например, для залива Кара-Богаз-Гол, соленость воды которого достигает 300‰, осмотическое давление будет примерно в 8,5 раз выше — более 200 атм. Высокие значения осмотического давления открывают перспективы получения с его помощью значительной энергии.

Для получения осмотической энергии необходимо иметь вблизи более или менее концентрированного раствора источник с малой концентрацией соли. В условиях Мирового океана такими источниками являются устья впадающих в него рек.

Энергия градиента солености, рассчитанная по осмотическому давлению, не подвергается ограничениям по КПД, связанным с циклом Карно; в этом заключается одна из положительных особенностей этого вида энергии. Вопрос состоит в том, как лучше преобразовать ее в электроэнергию.

На возможность применения осмоса для преобразования впервые указали в 1974 г. Ливеншпиц и Неверс, предложившие несколько теоретических вариантов преобразователей¹⁰. Практический интерес представляет вопрос о величине достижимой мощности осмотических преобразователей. Основным элементом их конструкции яв-

¹⁰ Levenspiel O., Nevers N. Osmotic Pump. — Science, 1974, vol. 183, N 4121, p. 157–160.

ляется полупроницаемая мембрана. От качества ее работы во многом зависят характеристики осмотического преобразователя, поскольку осмотический перенос вещества растворителя определяется сложными процессами в мембране. Обычно желательно получить максимальную пропускную способность мембраны для молекул растворителя. Но пропускная способность мембраны ограничена сопротивлением пограничных слоев, неизбежно образующихся при переносе ионов через ее толщу. Точный механизм процесса переноса ионов через мембрану на сегодняшний день еще не вполне ясен.

Диффузионная теория переноса в линейном приближении дает следующее выражение для проницаемости пограничных слоев мембраны:

$$P = d_1 d_2 / (\delta_2 d_1 + \delta_1 d_2),$$

где d_1 и d_2 — коэффициенты диффузии каждого слоя; при нормальных условиях их можно принять равными 10^{-5} см²/с; δ_1 и δ_2 — толщина каждого из пограничных слоев; согласно литературным данным¹¹, равна 100 мкм.

При указанных данных для проницаемости пограничных слоев получаем значение $P=5 \cdot 10^{-4}$ см²/с, что соответствует максимальному расходу растворителя 5 мл/с через 1 м² поверхности полупроницаемой мембраны.

К. В. Кукуджанов и Д. В. Шувалов¹² задались целью получить в лабораторных условиях возможно большую мощность при использовании солености раствора, близкой к средней для океана (т. е. 35‰).

Мощность осмотической установки определяется уравнением

$$N = Q \Delta P = k \{ \pi_0 \Delta P - (\Delta P)^2 \},$$

где Q — расход воды через мембрану; ΔP — разница гидростатических давлений по обе стороны мембраны.

Величину расхода пресной воды через полупроницаемую мембрану можно определить по формуле

$$Q = k (\pi_0 - \Delta P),$$

¹¹ См.: Котык А., Яначек К. Мембранный транспорт. М.: Мир, 1980, с. 338.

¹² Кукуджанов К. В., Шувалов Д. В. Экспериментальная установка для преобразования энергии осмотического давления. — В кн.: Тр. Всесоюз. студ. конф. XV Королевские чтения. М.: ВИНТИ, 1984, № 6660.

где π_0 — осмотическое давление; k — коэффициент пропорциональности.

Анализ выражения для мощности осмотической установки показывает, что максимальная мощность достигается при $\Delta P = \pi_0/2$.

Экспериментальная установка состоит из короткого металлического цилиндра диаметром около 200 мм, к обоим торцам которого прижаты две полупроницаемые мембраны из ацетатной целлюлозы. Сборка выполнена с помощью металлических щечек и стяжных шпилек, в щечках имеются многочисленные отверстия для пропуска воды к мембранам. В стенке цилиндра есть выпускное отверстие диаметром 2 мм, плотно закрытое пробкой. Перед опытом в цилиндр заливается вода соленостью $35^{\circ}_{\text{‰}}$ и цилиндр помещался в бак с водопроводной водой. Под влиянием осмотического давления пресная вода из бака проникает через мембраны внутрь цилиндра и там повышается давление, в результате чего щечки цилиндра получают упругую деформацию. Через заданное время пробка вынимается и вода под давлением фонтанирует из цилиндра. По высоте фонтана и времени выдержки определяется расход, давление и вычислялась мощность установки.

Максимальное значение мощности достигало 7,4 Вт в пересчете на 1 м^2 площади мембраны при расходе 4,4 мл/с через 1 м^2 ее поверхности. Пропускная способность мембраны, полученная опытным путем, близка к максимальной возможной теоретически. Следует отметить, что использованные ацетатцеллюлозные мембраны значительно дешевле и долговечнее ионообменных.

Известны и другие способы преобразования энергии градиента солености в электрическую энергию, например, диалитическая батарея Вайнштейна и Лейтца, испытывавшаяся при разности солености в $32^{\circ}_{\text{‰}}$ ¹³. Батарея может производить 0,338 Вт с 1 м^2 пары катион- и анионообменных мембран при нагрузке 8,9 Ом. Выделяемая батареей мощность мала, мембраны дороги и недолговечны, поэтому устройства такого типа для преобразования энергии градиента солености едва ли можно считать перспективными.

Другой физический принцип преобразования энергии градиента солености был предложен Олсоном, Уиком

и Айзексом¹⁴. Они предложили воспользоваться разностью давлений насыщенных паров, имеющейся над пресной водой и водным раствором с высоким содержанием соли. Известно, что с увеличением содержания соли в морской воде давление насыщающего пара над ее поверхностью уменьшается. На этом принципе был выполнен действующий макет установки, где за счет потока водяных паров вертелась микротурбина. Расчеты показали, что таким путем возможно получение мощности до 10 Вт с 1 м^2 площади теплообменника. Это — хорошая цифра, но ее получение требует применения концентрированного раствора соленостью порядка $350^{\circ}_{\text{‰}}$. В естественных условиях рассол подобной концентрации кроме залива Кара-Богаз-Гол встречается в Мертвом море и во впадинах на дне Красного моря. Вторая трудность использования этого метода преобразования состоит в необходимости применения вакуума внутри установки для обеспечения ее бесперебойной работы, что усложняет работу установки в условиях открытого моря.

Имеются сообщения о разработке и других установок для преобразования энергии градиента солености. Градиент солености весьма привлекательный источник энергии Мирового океана, отличающийся значительными достоинствами, его практическое использование связано с нахождением оптимального способа преобразования.

¹³ Weinstein, Leitz. Electric Power from Differences in Salinity: The Dialytic Battery. — Scienc, 1976, vol. 191, N 4227, p. 557—559.

¹⁴ Olsson M., Wick G. L., Isaacs I. D. Salinity Gradient Power: Utilising Vapor Pressur Differences. — Science, 1979, vol. 206, № 4417, p. 452—454.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРОВЫХ ВОЛН И ЗЫБИ

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Академик В. В. Шулейкин в свое время отметил три основных направления, по которым шла конструкторская мысль в использовании энергии поверхностных волн. С тех пор прошло достаточно много времени и появились новые способы использования энергии волн. Список авторских свидетельств и патентов на способы и устройства для преобразования энергии волн насчитывает ныне более 2000 наименований.

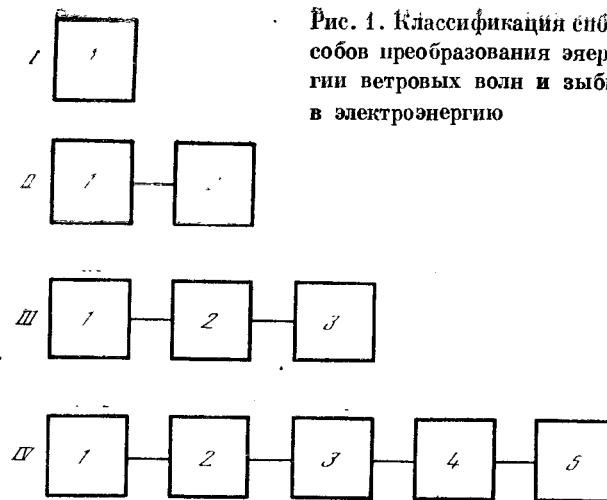
В наши дни для преобразования энергии волн в электрическую энергию используются семь волновых эффектов: изменение уровня воды, продольные колебания жидкости, пространственная скорость жидкости, изменение наклона свободной поверхности, переменное изгибание вслед за свободной поверхностью, гидродинамическое давление, переменное гидростатическое давление¹. Значительное число устройств, действующих на основе перечисленных эффектов, функционирует по полупериодному циклу с восстановлением исходного состояния силой тяжести.

Можно добавить некоторые другие физические явления, могущие получить или уже имеющие важное значение при использовании энергии волн. Например, инерционные преобразователи. Сила инерции с успехом используется в гидравлических преобразователях энергии волн.

Все многочисленные устройства для преобразования энергии поверхностных волн в электрическую энергию, основанные на использовании самых различных физических свойств (эффектов) поверхностных волн, можно разделить на четыре группы (рис. 1). Римской цифрой I обозначено прямое преобразование энергии волн в электрическую энергию. Устройство этой простейшей схемы состоит из одного генератора электрической энергии I.

¹ См.: Сичкарев В. И. Волноэнергетические ресурсы и их использование. — В кн.: Методы преобразования энергии океана. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1983, с. 72.

Рис. 1. Классификация способов преобразования энергии ветровых волн и зыби в электроэнергию



Волны непосредственно отдают ему свою энергию. Если генератор будет обладать достаточно высоким КПД, то такая схема — идеальный случай преобразования.

Но можно ли создать подобный электрический генератор? Принципиально — можно. Например, на основе пьезоэлектрического эффекта. Как известно, он заключается в возникновении электрических зарядов при упругой деформации в определенных направлениях пьезоэлектрических веществ. Классический пример таких веществ — кристаллы пьезокварца. И некоторые другие вещества, общее количество их более 1200. При давлении на них в определенном направлении (или растяжении) на плоскостях кристаллов выделяются электрические заряды. Механическая работа непосредственно превращается в электрическую энергию. Казалось бы, чего лучше.

Пьезоэффект широко применяется при изменении давления в двигателях внутреннего сгорания, стволах артиллерийских орудий, подшипниках вагонных осей. За более чем столетний срок со дня открытия пьезоэлектричества история его применения не знает случаев, когда бы преобразователи на его основе оказались непригодными для измерительной техники. Применялись они с успехом и для измерения силы удара морских волн и для решения многих других задач, в том числе в акустике, инфракрасной и ультразвуковой технике и пр.

Однако энергетических установок, использующих пьезоэффект для выработки электрической энергии, не существует. Одна из главных причин — ничтожно малая мощность пьезоэлектрических источников, связанная с малым значением пьезоэлектрического модуля². Если еще учесть очень низкую частоту колебаний поверхностных волн, на этом пути пока не приходится рассчитывать на получение практически важных результатов. Немного электрической энергии будет выделяться в момент удара гребней волн о пьезопреобразователь, а в остальное время напряжения практически не будет.

В случае двухзвенного способа использования энергии поверхностных волн (см. рис. 1, II) волны первоначально отдают свою энергию тому или иному механическому приемнику-преобразователю 1. Это своего рода антенна, принимающая энергию волнового поля. Однако его функции этим не ограничиваются: одновременно происходит преобразование энергии волн в другой вид механической же энергии. Преобразованная механическая энергия волн передается генератору электрической энергии 2.

Приемник-преобразователь может иметь различную форму. Простейший случай — плита или пластина, совершающая колебания относительно горизонтальной оси. Поверхностные волны набегают на пластину и, отдавая ей свою энергию, заставляют совершать вынужденные колебания. Теоретические расчеты и экспериментальные исследования показывают, что подобный приемник-преобразователь может иметь вполне удовлетворительный КПД и способен развивать достаточную мощность.

С энергетической точки зрения самым важным требованием является высокий КПД первичного преобразователя. Сложнее обстоит вопрос о том, как мощность, развиваемую приемником (плитой), использовать для выработки электричества. Речь идет о превращении периодических колебаний плиты в электрическую энергию.

Вся современная электротехника основана на преобразовании механической энергии в электрическую с помощью генераторов переменного тока (или динамомашин). Их действие основано на законе электромагнитной индукции, открытом Фарадеем. Этот закон гласит, что индуцируемая электродвижущая сила пропорциональна ско-

рости изменения магнитного потока. Согласно закону электромагнитной индукции ротор (якорь) электрической машины должен быстро вращаться (со скоростью тысяч оборотов в минуту). Только тогда можно получить достаточно большую мощность. Но ветровые волны и зыбь в морях и океанах имеют низкую частоту колебаний, они относятся к инфразвуковому диапазону — одно полное колебание совершается за несколько секунд. Обычно их период — не менее 3—4 с, например, для Черного моря, и до 10—20 с на просторах океана. Соответственно малы и колебательные скорости.

Если ось того или иного приемника энергии волн (например, плиты) соединить с ротором генератора электрической энергии согласно схеме II, то ротор будет совершать медленные колебания то в одну, то в другую сторону. Снимаемая электрическая мощность будет ничтожно мала. Очевидно, в данном случае, т. е. при медленных колебательных движениях пластины и ее оси, нельзя применять стандартный генератор. Надо использовать другой, который мог бы удовлетворительно работать в режиме колебаний. Тогда можно будет получить мощность в несколько ватт, что достаточно для некоторых целей, например, для питания энергией небольшого навигационного буйа. По схеме II можно получить и значительно большую мощность, если использовать новейшие мощные магниты на основе редких земель.

А почему бы не поставить редуктор между осью медленно колеблющегося механического приемника энергии волн и валом генератора электрической энергии (разумеется, речь идет о повышающем редукторе), чтобы он увеличивал число оборотов вала генератора до необходимой величины. Плюс, конечно, простейший механизм, обеспечивающий вращение ротора только в одну сторону. Например, так, как это сделано в динамоэлектрических фонариках, известных под названием «жучок» или «жужжалка». В этих фонариках относительно редкие нажимы на рычаг пальцами руки обеспечивают непрерывное и достаточно равномерное горение лампочки накаливания. Достигнуто это за счет большего передаточного отношения — в корпусе фонарика смонтирован повышающий редуктор из нескольких пар шестеренок. Редуктор имеет необходимое передаточное отношение и обеспечивает достаточную скорость вращения ротора. Кстати, ротор сделан достаточно массивным и выполняет роль маховичка, обеспечивающего выравнивание скорости враще-

² Пьезоэлектрический модуль — размерный коэффициент, связывающий количество выделенного электричества с силой давления на пьезокристалл.

ния. Нельзя ли применить аналогичную кинематическую схему и для использования энергии поверхностных волн?

На этот вопрос отвечает заводская инструкция к электродинамическому фонарику, которая не рекомендует в начале пользования фонариком, т. е. при его разгоне, делать рукой резкие нажимы на рычаг. Иначе могут поломаться зубья шестеренок. А как быть с волной? Ведь ее не заставишь соблюдать инструкцию. Удары волн отличаются большой силой. Рельсы гнутся под ударами штормовых волн! Под их ударами зубья шестерен будут крошиться и быстро выходить из строя. В этом давно убедились конструкторы и изобретатели волновых машин в разных странах. И начали искать такие пути, которые позволили бы обеспечить съем энергии и необходимую редукцию без непосредственного контакта того или иного механизма с гребнями волн.

В результате длительных поисков в схемах устройств для преобразования энергии поверхностных волн между приемником-преобразователем и валом электрического генератора появляется второй преобразователь (см. рис. 1, III). В этой схеме три основных элемента: приемник-преобразователь 1, второй преобразователь 2 и генератор электрической энергии 3.

В группу III входят преобразователи, работающие на различных физических принципах. Типичным представителем этой группы можно считать волноэнергетическую установку, предложенную английскими учеными Уиттекером и Уэлсом. Установка состоит из пневматического приемника-преобразователя энергии волн, воздушной турбины и электрического генератора. Оригинальное конструктивное решение позволило авторам обойтись без клапанов и избежать многочисленных поворотов воздушного потока. Применение воздуха в качестве рабочего тела, отбирающего энергию поверхностных волн, исключает необходимость в непосредственном контакте волн с лопатками турбины и придает надежность установке в целом. Воздушная турбина здесь выступает в качестве второго преобразователя. Известны и другие установки этой группы. Важно отметить, что вид механической энергии на выходе первичного преобразователя должен быть удобен для преобразования в электрическую энергию. Это требование не менее важно, чем требование высокого КПД.

Поскольку в мощных волноэнергетических установках в настоящее время может идти речь об использовании лишь более или менее типовых электрических генераторов,

то предпочтительнее применять такие преобразователи, которые могут обеспечить получение непрерывного вращения выходного вала. Однако получение вращательного движения с помощью энергии поверхностных волн, как это не удивительно, оказалось сложным делом. Наибольших успехов в этой области удалось добиться с помощью пневматических методов преобразования. Первым практическим шагом на этом пути была пневматическая установка японского ученого И. Масуды, имеющая относительно сложный первичный приемник-преобразователь, работающий на воздушную турбину, т. е. на второй преобразователь, соединенный с валом электрического генератора.

Большой практический интерес представляет также применение гидравлических турбин. Беда, однако, заключается в том, что обычные гидравлические турбины, прекрасно зарекомендовавшие себя при работе на стационарных потоках на гидроэлектростанциях, не могут работать в волновом потоке из-за периодического изменения знака скорости. Не успевает турбина раскрутиться в одном направлении, как происходит изменение направления скорости воды в волне, вследствие чего турбина должна остановиться и потом раскручиваться в противоположном направлении. Естественно, что тот же процесс происходит и с генератором электрической энергии, вал которого соединен с валом турбины. В таком режиме обычные генераторы не могут отдавать необходимую мощность.

Имеется только один способ заставить хорошо работать обычную гидравлическую турбину за счет энергии поверхностных волн. Он состоит в применении особого приемника-преобразователя, обеспечивающего подачу воды на турбину всегда в одном направлении. Либо надо вообще отказаться от применения обычных турбин. Известны устройства, способные вращаться в одном направлении в поле гравитационных поверхностных волн (их обычно не принято называть турбинами, хотя ошибки в этом нет). Например, ротор Савониуса. Он всегда вращается в одном направлении, с какой бы стороны не подходил к нему поток. Но в волновом потоке ротор Савониуса значительно снижает свой КПД. По данным В. В. Шулейкина, в постоянном потоке при скорости 2 м/с такой ротор развивал мощность около 4,5 л. с., а в волновом потоке при средней волне — не более 1/3 л. с., т. е. происходит уменьшение мощности в 13,5 раза. КПД ротора в стационарном потоке, по тем же данным, колеблется в пределах от 26 до 30 %, поэтому в волновом потоке он составлял всего около 2 %.

Не так давно был создан преобразователь, имеющий устойчивый вращающий момент в поле гравитационных волн. Он дает один оборот вала на одно полное колебание поверхностной волны, т. е. на один период, поэтому необходим редуктор для повышения числа оборотов, который здесь играет роль второго преобразователя. В этом случае возможна практическая реализация волноэнергетической установки по схеме III.

Пятизвенная схема волноэнергетической установки (см. рис. 1, IV) состоит из приемника энергии волн 1, одновременно выполняющего роль первичного преобразователя, вторичного преобразователя 2, аккумулятора (накопителя) преобразованной энергии 3, двигателя, или третьего преобразователя 4 и генератора электрической энергии 5. Эта группа представляет наиболее общий случай построения установок для использования энергии поверхностных волн. Известно несколько волноэнергетических установок, построенных по этой схеме. Разница между ними состоит в использовании различных первичных преобразователей, что иногда приводит к перестановке местами отдельных звеньев или к замене их другими. Но общее число основных звеньев остается неизменным.

Типичный представитель группы IV — так называемый плот Коккереля (английского изобретателя). Первое звено этой системы — приемник энергии волн в виде плота из нескольких звеньев 1, шарнирно соединенных между собой. При прохождении вдоль плота поверхностных волн его звенья изменяют наклон относительно друг друга, стремясь расположиться по уровню свободной поверхности очередной волны. Происходит как бы своеобразная «кусочная» линейная аппроксимация профиля волны звеньями плота. При этом совершается работа, используемая вторым преобразователем 2. В качестве второго преобразователя работают насосы, накачивающие рабочую жидкость в гидравлический аккумулятор 3. Следовательно, механическая энергия колебаний звеньев плота преобразуется в энергию гидравлического потока, запасаемую в гидравлическом аккумуляторе. Оттуда, по мере надобности, рабочая жидкость поступает в гидравлический двигатель 4, вращающий генератор электрической энергии 5³.

* Идея механического приемника энергии волн в виде шарнирного плота была высказана К. Э. Циолковским в 1935 г. См.: *Циолковский К. Э.* Полн. собр. соч. М.: Наука, 1964, т. 4, с. 363.

Эта схема сложнее предыдущих. Главный недостаток плота Коккереля заключается в высокой стоимости обслуживания волноэнергетических установок, связанной с необходимостью оплаты высококвалифицированного персонала для обслуживания гидравлических систем. Именно по этой причине английское правительство прекратило с 1982 г. дальнейшее финансирование работ в этом направлении. Однако необходимо подчеркнуть, что дороговизна обслуживания не является общим недостатком систем, построенных по схеме IV, а относится лишь к устройствам типа плота Коккереля.

В качестве рабочего тела в установках по схеме IV используются масло или вода. Положительная особенность применения масла состоит в значительном уменьшении влияния коррозии на рабочие механизмы установки. Все же, видимо, нельзя говорить о полном устранении коррозионных явлений из-за неизбежного случайного проникновения морской воды в гидравлическую систему через различные неплотности, в том числе через сальники. Как известно, морская вода отличается высокой агрессивностью. Но применение масла в качестве рабочей жидкости приводит к значительному усложнению и удорожанию установки в целом. Поэтому представляют большой интерес системы, могущие работать с водой в качестве рабочей жидкости.

Одно из первых устройств такого типа было предложено советским изобретателем А. Г. Барановым в 1936 г. В последние годы в этом направлении успешно работал американский ученый Д. Айзекс с коллегами (Институт использования морских ресурсов Калифорнийского университета). В любом случае применяется водяная турбина, спаренная с генератором электрической энергии. Возможность использования обычных гидравлических турбин в этом случае обеспечивается особым устройством приемника-преобразователя. Он выполнен так, что подает за счет энергии волн на гидравлическую турбину водяной поток неизменного направления.

Волноэнергетическая установка этого типа укладывается в схему IV, но порядок следования основных составляющих элементов изменяется: после первичного преобразователя ставится пневмогидравлический аккумулятор, работающий на турбину. Если турбина достаточно быстроходная, то ее вал можно непосредственно связать с валом генератора электрической энергии. В этом случае число основных звеньев установки сокращается с пяти

до четырех. Это очень важно, поскольку каждое звено имеет КПД меньше единицы. В результате сокращения числа звеньев повышается суммарный КПД установки и, главное, возрастает ее надежность и упрощается обслуживание. К тому же получить хороший редуктор не всегда легко. Высоким КПД с необходимым передаточным отношением обладают планетарные редукторы, но при их изготовлении требуется высокая точность. Другой путь — применение низкооборотного генератора переменного тока. Подобные генераторы имеют большие габариты и редко применяются в наше время. Поэтому подбор эффективной пары турбина—генератор является одной из сложных задач при разработке таких установок.

Установки этого типа могут одинаково успешно работать как на пресной, так и на соленой воде. Практическая значимость их не вызывает сомнений.

Вместо гидравлических аккумуляторов в установках по схеме IV могут применяться и другие типы накопителей энергии. Простейший из них — маховик. Расчеты показывают, что маховик с вполне приемлемыми размерами может обеспечить достаточно равномерное вращение вала генератора электрической энергии в установках не слишком высокой мощности. Еще один пример — пневматический аккумулятор.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

На основе пьезоэлектрического эффекта А. С. Шейным был построен маленький электрический генератор (рис. 2), главная деталь которого — кристалл сегнетовой соли, немного больше тех, какие применяются в звукозаписывающих электропроигрывателях или в пьезоэлектрических микрофонах. Проводящие обкладки кристалла из фольги 1 соединены двумя изолированными проводами с неоновой лампочкой 2. Если кристалл изогнуть или легонько щелкнуть по нему пальцем, то неоновая лампочка вспыхнет. А чтобы она горела непрерывно, надо вертеть ручку 3, соединенную с зубчатым колесиком (трепещоткой) 4. При вращении ручки зубья трепещотки изгибают кристалл несколько раз за один ее оборот, благодаря чему неоновая лампочка кажется горящей непрерывно.

Это — макет пьезоэлектрического генератора, принцип действия которого основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте. С его помощью механическая энергия, развиваемая рукой, непосредственно превращается

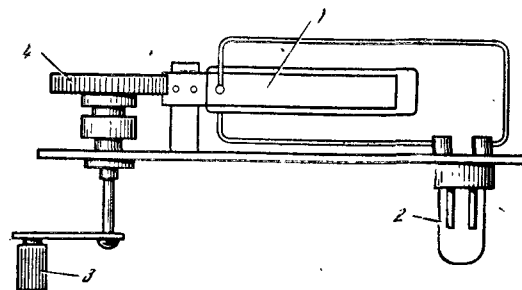


Рис. 2. Кинематическая схема пьезоэлектрического преобразователя А. С. Шейна («трепещотка»)

в электрическую энергию, идущую на свечение неоновой лампочки.

При пьезоэлектрическом преобразовании отсутствуют затруднения, связанные с преобразованием энергии поверхностных волн на основе закона электромагнитной индукции. Дело в том, что скорость орбитального движения воды в поверхностных волнах обычно мала, а использование закона электромагнитной индукции для выработки электрической энергии эффективно лишь при достаточно высоких скоростях. Именно поэтому, как правило, требуется применение того или иного типа преобразователей для повышения скорости до достаточной величины, когда работа преобразователей на основе принципа электромагнитной индукции становится эффективной. Но любой преобразователь имеет много разных механических частей и поэтому не всегда отличается высокой надежностью, необходимой при работе в тяжелых морских условиях.

Электрическая энергия, вырабатываемая пьезоэлектриками, не зависит от скорости их деформации. Электрический заряд, возникающий при пьезоэффекте, прямо пропорционален давлению на пьезоэлемент. Подобная зависимость благоприятна для использования энергии волн на поверхности воды; морские волны способны развивать большие давления при относительно малых скоростях.

Поверхностные волны с успехом могут выполнять работу по механической деформации того или иного пьезоэлектрика. Но решение вопроса о практическом применении пьезоэффекта для использования энергии волн состоит в нахождении подходящего пьезопреобразователя. Наибо-

лее чувствительным из числа известных сегодня является сегнетовая соль. Именно поэтому она широко применяется в гидроакустике и радиотехнике. Однако с точки зрения использования энергии волн ее нельзя считать приемлемой по нескольким причинам. Одна из них — недостаточная механическая прочность, вторая — чувствительность к парам воды. При любом применении кристаллов сегнетовой соли их необходимо защищать от непосредственного контакта с водой. Сегнетова соль — гигроскопична, ее кристаллы разрушаются под действием влаги. Но с этим затруднением можно справиться, например поместив кристалл в масло, как это обычно и делается в гидроакустике. Главное затруднение в другом — в малости пьезоэлектрического модуля. Чтобы оценить имеющиеся возможности, сделаем следующий расчет.

Согласно закону Кюри, количество электричества, выделившегося при механической деформации пластинки из того или иного пьезокристалла, определяется формулой

$$Q = kF \text{ К},$$

где k — пьезоэлектрический модуль, значение которого зависит от используемого пьезоэлектрика. Для сегнетовой соли

$$k = 3 \cdot 10^{-9},$$

где F — действующая сила, кг.

Электрическое напряжение, развиваемое деформируемым пьезокристаллом,

$$U = Q/C = kF/C \text{ В},$$

где C — емкость пластинки вместе с подводящими проводами (в фарадах). Пусть $C = 20 \cdot 10^{-12}$ Ф, $k = 3 \cdot 10^{-9}$; $F = 1$ кг. Тогда

$$U = \frac{kF}{C} = \frac{3 \cdot 10^{-9} \cdot 1}{2 \cdot 10^{-11}} = 1,5 \cdot 10^2 = 150 \text{ В}.$$

Полученное напряжение вполне достаточно для зажигания неоновой лампочки. Расчет был сделан для работы пьезокристалла на сжатие, тогда как в генераторе («трещотке») Шеина используется деформация изгиба, что принципиально ничего не меняет. Для получения большего напряжения или тока необходимо соединить вместе несколько пьезоисточников последовательно или параллельно. Именно так сделано в зажигалках на пьезо-керамике для газа, напряжение разряда в них может

достигать 10—15 тыс. В при токе в искре до 10 мкА. Электрическая мощность подобной зажигалки достигает 0,1—0,15 Вт, что значительно превосходит мощность «трещотки».

Электрическая энергия, запасенная в емкости C , заряженной до напряжения U , определяется формулой

$$W_1 = CU^2/2 = k^2 F^2 / 2C, \text{ Дж}.$$

Эта формула позволяет вычислить электростатическую энергию, возникающую в пьезоэлектрической пластинке площадью в 1 см² под действием силы F (кг). Если деформации одновременно подвергаются несколько последовательно соединенных пьезопластинок, то генерируемое напряжение будет соответственно больше:

$$U_n = nQ/C = nkF/C \text{ В},$$

где n — число одновременно деформируемых пластинок. Суммарная энергия ансамбля из n пластинок будет

$$W_n = n^2 k^2 F^2 / 2C \text{ Дж}.$$

Примем площадь каждой пластинки 100 см², $n = 100$ штук, $F = 100$ кг, $C = 10^{-10}$ Ф. Получим

$$W_n = \frac{(10^2)^2 (3 \cdot 10^{-9})^2 (10^2)^2}{2 \cdot 10^{-10}} = 5 \text{ Дж}.$$

При набегании поверхностных волн на твердую стенку обычно происходит их частичное или полное разрушение, сопровождающееся выделением большого количества энергии. Давление при ударе в этом случае можно оценить по приближенной формуле, приводимой В. В. Шулейкиным⁴:

$$P_\lambda \approx 0,09 T^2 \text{ т/м}^2 = 0,009 T^2 \text{ кг/см}^2,$$

где P — ударное давление, т/м²; T — период волны, с. При $T_\lambda = 10,5$ с $T_\lambda^2 = 112$ с², $P_\lambda \approx 1,1$ кг/см², $F = 110$ кг, что близко соответствует рассмотренному примеру.

Следует отметить, что подсчитанная сила ударного давления волн соответствует так называемому давлению навала волн, длящемуся 0,01—0,02 с; этому давлению предшествует короткий пик ударного давления, имеющий примерно на порядок меньшую длительность, т. е. 0,001—0,002 с, и примерно вдвое большее значение, т. е. 200—220 кг. Поэтому максимальное значение электрической

⁴ Шулейкин В. В. Краткий курс физики моря. Л.: ГИМИЗ, 1959.

энергии при таком ударе будет примерно вчетверо выше, т. е. 20—25 Дж.

Максимальная электрическая мощность за время короткого пика $\tau_{\text{пик}}$ давления определится из отношения $W_p/\tau_{\text{пик}} = 20/10^{-3} = 20\,000$ Вт, но средняя мощность будет мала, так как ударные импульсы возникают только при ударе гребня, а он бывает один раз за период, принятый в нашем случае $T_\lambda = 10,5$ с.

Поскольку мы не можем увеличить частоту ударов волн, реальный путь увеличения средней мощности заключается в увеличении площади пьезоэлектрика. В последние годы на этом пути открылись новые перспективы.

В свое время академик А. В. Шубников указал на возможность создания искусственных пьезотекстур. В 1970 г. японские химики нашли пьезоэлектрические свойства у поливинилденфторида. Это полимер, пластмасса, по своему строению занимающая промежуточное положение между полиэтиленом и тефлоном. В отличие от последнего, в молекуле поливинилденфторида лишь у половины атомов углерода водородные связи замещены фтором, на остальных остался водород. Такая конструкция молекулы вызывает выделение электрических зарядов при механических деформациях пленки из поливинилденфторида. При ударе, изгибе или скручивании вокруг полимера наблюдается образование электрического поля, как и у любого другого пьезоэлектрика.

Первоначально японским исследователям удавалось изготавливать пленку толщиной не более $1/10$ мм и она не обладала достаточной механической прочностью. Но недавно французская компания «Томсон-ЦСФ», применив новую технологию, освоила производство пленок и пластинок из поливинилденфторида практически любой толщины. Из них начат выпуск пьезоэлектрических микрофонов для телефонных аппаратов. Такой микрофон отличается хорошими акустическими характеристиками, не требует питания и не боится падений и ударов.

Самое интересное заключается в предложении применить новый полимер для использования энергии волн. Для этой цели предлагают обкладывать толстой пленкой из поливинилденфторида скалы на морском побережье: постоянно бьющий о берег прибой будет бесплатно давать электроэнергию.

Создание нового полимера с пьезоэлектрическими свойствами свидетельствует о том, что прямое превращение механической энергии в электрическую с помощью

пьезоэффекта в настоящее время вступает в новую фазу.

Макет пьезоэлектрического генератора А. С. Шеина сегодня может кому-нибудь напомнить опыт с наэлектризованным гребешком, притягивающим обрывки бумаги; подобные опыты были в моде около 200 лет назад. Но здесь уместно вспомнить замечательное высказывание Дж. Гарднера: «инженер переоценивает то, что способен совершить за год, и крайне недооценивает то, чего он добьется за ближайшее десятилетие». С помощью простого по своему устройству пьезоэлектрического преобразователя можно непосредственно без каких-либо промежуточных звеньев превратить удар волны в электрическую энергию. Пока эта энергия очень мала, но перспективы очевидны. Преобразователи этого типа вполне соответствуют первой группе приведенной классификации.

ПЛИТА В КАЧЕСТВЕ ПРИЕМНИКА ЭНЕРГИИ ВОЛН

Приемник энергии поверхностных волн в виде плиты (или, как тогда называли, платформы) был использован около 100 лет назад в одной из первых волноэнергетических установок (рис. 3), построенной в Ошен-Грове, в 110 км южнее Нью-Йорка. «В этой местности силой волн воспользовались для поднятия морской воды в резервуар водонапорной башни, откуда она распределялась по соседству для орошения улиц. Между устоями подвешен ряд платформ, могущих вращаться на горизонтальной оси, расположенной в верхней части платформ. Длина у этих платформ такова, что во время отлива они погружаются в море на $1/2$ м, во время прилива — на 2,1 м, а ширина около 2 м. При своем движении волны качают эти платформы на поддерживающих их осях. Верхними своими частями платформы соединяются посредством крепких прутков со стержнем поршня горизонтально расположенного насоса. Каждому движению платформы соответствует движение поршня, вгоняющего некоторое количество воды в резервуар, помещающийся на вершине башни высотой 12 м. Это сооружение вполне удовлетворяет своему назначению и в спокойные дни»⁵.

⁵ Дебо Эмиль. Чудесное в науке. М., 1892, с. 181.

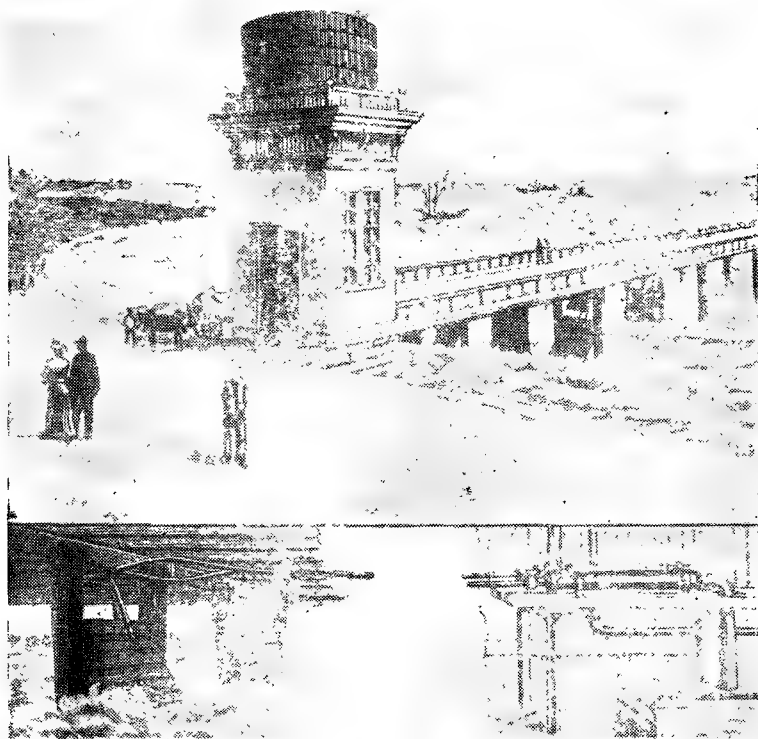


Рис. 3. Волновая установка в Ошен-Грове (1899 г.) для накачивания морской воды в резервуар водонапорной башни

вверху — общий вид, внизу — пластины, колеблющиеся под действием волн, штанги и насосы

На рисунке видна эстакада, под которой расположены плиты, приводимые в колебательное движение волнами, набегающими с океана. На береговом конце эстакады — башня, в верхней части ее расположен водонапорный бак. Внизу рисунка в увеличенном масштабе показан простейший механизм, передающий колебания плит с помощью тяг к штокам водяных насосов. Установка в целом подкупает простотой своего устройства. Можно предполагать, что установки такого типа могли бы оказаться полезными и в наше время для накачивания воды в прибрежных районах. Главное преимущество их очевидно — используется даровая энергия волн, отсутствует потреб-

ность в дефицитном топливе для двигателя. Как видим, плита в качестве приемника энергии поверхностных волн не потеряла своего значения и теперь. Одно из важных достоинств ее заключается в относительно высоком коэффициенте полезного действия.

Движение жидкости, вызываемое колебаниями тонкой вертикальной пластины, относится к числу немногочисленных водно-волновых проблем, которые допускают решение в явной форме. В 1976 г., почти 100 лет спустя после создания установки в Ошен-Грове, английский ученый Д. Ивенс теоретически рассмотрел работу тонкой вертикальной пластины в качестве приемника энергии поверхностных волн. Под действием приходящих волн пластина вынуждена качаться относительно горизонтальной оси, расположенной на уровне поверхности спокойного моря. Нижний край пластины погружен на определенную глубину (a), ее величина является радиусом качания пластины относительно горизонтальной оси.

Ивенс вывел формулу для расчета КПД тонкой плиты (или пластины) как приемника энергии поверхностных волн. Под КПД понимается доля энергии поверхностных волн, которая может быть поглощена, т. е. воспринята пластиной. Назовем его механическим КПД приемника энергии. Пластина симметрична относительно вертикальной оси, проходящей через точку $m'=0$. Коэффициент полезного действия определяется формулой

$$\eta_m = \frac{4\nu(1-\delta)(\sqrt{1/2}\lambda_i)(\sqrt{1/2}\lambda_{i0})}{\{(m' + \mu_{i0})v_0 - (m' + \mu_0)v\}^2 + \nu(\sqrt{1/2}\lambda_i + \sqrt{1/2}\lambda_{i0})^2},$$

где $\nu = \omega a / g = 2\pi a / \lambda$ — безразмерное волновое число колеблющегося тела, поглощающего энергию волн; $v_0 = \omega_0 a / g$ — безразмерное волновое число колеблющегося тела, соответствующее максимальному значению КПД; ω — угловая частота поверхностных волн; ω_0 — угловая частота поверхностных волн, соответствующая максимуму КПД пластины; a — максимальное углубление нижнего конца колеблющейся пластины; λ — длина поверхностных волн; λ_i — безразмерный коэффициент поглощения энергии волн; λ_{i0} — безразмерный коэффициент поглощения энергии волн для максимального значения КПД; $m' = m / M$ — отношение массы колеблющегося тела к массе вытесненной им воды; обе массы взяты на единицу длины; $\mu_i = a_{ii} / M$ — безразмерная присоединенная масса для колеблющегося тела (пластины); a_{ii} — масса воды, присоединенная к колеблющемуся телу;

$\mu_{i0} = \mu_i(v_0)$; $\delta = \frac{|A_i^-|^2}{|A_i^+|^2 + |A_i^-|^2}$ — коэффициент потерь; A_i^- — комплексная амплитуда волны, полученной на поверхности воды от вынужденных (силовых) колебаний пластины за счет постороннего источника энергии (например, электропривода) на расстоянии минус бесконечность в отсутствие приходящих (падающих) волн; A_i^+ — то же для расстояния плюс бесконечность.

Максимальное значение КПД определяется выражением $\eta_{\max} = 1 - \delta$.

Преобразуем определение для коэффициента потерь δ в форму

$$\delta = \left(1 + \frac{|A^+|^2}{|A^-|^2}\right)^{-1}.$$

Это выражение позволяет оценить важность асимметрии в конструкции колеблющегося тела. Если оно в режиме генерации волн вызывает на поверхности воды одинаковые цуги волн вправо и влево от точки их возникновения, то $|A^+| = |A^-|$, $\delta = 0,5$, максимальное значение КПД не выше 50%, как в рассматриваемом случае применения тонкой симметричной пластины в качестве приемника энергии волн. Если же колеблющееся тело имеет несимметричную форму, возможно, что $|A^+|$ будет значительно больше $|A^-|$ и отношение этих двух величин будет значительно больше единицы, следовательно, коэффициент δ станет меньше 0,5, благодаря чему КПД преобразователя возрастет.

На рис. 4 приведено полученное Ивенсом семейство кривых, показывающих зависимость КПД приемника энергии волн в виде пластины от безразмерного волнового числа ν при разных значениях v_0 . Кривые рассчитаны для $m' = 0$, т. е. для бесконечно тонкой колеблющейся пластины, когда ее собственная масса равна нулю. Интересна кривая для $v_0 = 0,5$; она имеет два максимума при $\nu = 0,6$ и $\nu = 1,8$, где КПД достигает почти 50%, а в интервале волновых чисел $\nu = 0,4 - 2,6$ КПД имеет значение, превышающее 0,4, т. е. более 40%. Хороших результатов следует также ожидать от пластины, имеющей волновое число v_0 в пределах 0,5—0,7. Например, пластина длиной 20 м при $v_0 = 0,5$ будет иметь эффективность свыше 40% при любой длине волны в пределах 50 м — 300 м. В лабораторных условиях подобный КПД возможен для пластины длиной 15 см и длине волны от 40 до 160 см.

Другое семейство кривых, построенных Ивенсом, по-

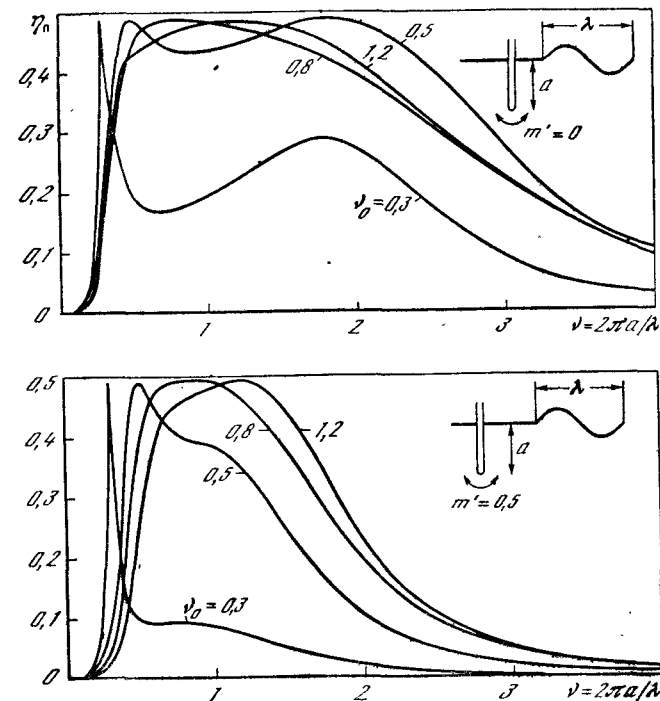


Рис. 4. Зависимость КПД приемника энергии волн в виде тонкой пластины (η_n) от безразмерного волнового числа (ν) для $m' = 0$ и $m' = 0,5$

казывает зависимость КПД пластины от волнового числа ν для разных значений v_0 ; эти кривые построены для $m' = 0,5$, т. е. для случая, более близкого к практике.

Сравнение семейств этих кривых показывает влияние возрастания инерции колеблющейся пластины. Ширина полосы эффективности по уровню КПД около 0,4 сократилась до диапазона $\nu = 0,42 - 1,62$; второй максимум исчез. Оптимальное значение v_0 возросло и стало близко, видимо, к значению $v_0 = 1,2$, обеспечивающему получение КПД выше 0,4 в пределах $\nu = 0,6 - 1,6$. Для пластины длиной 20 м КПД выше 40% при $m' = 0,5$ возможен для волн длиной 80—200 м.

Ивенсом выведено уравнение, позволяющее рассчитать амплитуду колебаний пластины как функцию волнового числа ν , и построены два семейства кривых для

$m'=0$ и $m'=0,5$, определяющих отношение амплитуды колебаний пластины к амплитуде падающей волны для разных значений ν_0 в пределах 0,3—0,8. При малых значениях ν_0 и ν кривые имеют резонансный характер: амплитуда колебаний нижнего конца пластины резко возрастает при сближении значений ν и ν_0 . Например, для $\nu_0=0,3$ максимальное смещение нижнего края пластины в 7 раз больше амплитуды падающей волны. Автор указывает, что столь большие колебания пластины не совместимы с какой-либо линейной теорией и что в этом случае следует ожидать нелинейных эффектов вплоть до разрушения волны. Добавим, что иначе и быть не может, поскольку всякие колебания пластины с амплитудой, большей амплитуды волн, вызовут разрушение волнового поля. Пластина перестанет отбирать энергию от волн и потребует подвода энергии для совершения работы перемешивания воды.

Приведенные соображения позволяют заключить, что механический приемник энергии поверхностных волн в виде тонкой плиты, колеблющейся вокруг горизонтальной оси, можно с успехом использовать для преобразования энергии волн. С помощью колеблющейся плиты или пластины можно построить простую и достаточно эффективную установку не только для накачивания воды, но и для преобразования энергии волн в электрическую энергию.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С КОЛЕБЛЮЩИМИСЯ МАГНИТАМИ

Фарадей открыл закон электромагнитной индукции с помощью постоянного магнита в виде стержня, который он вводил (рукой) в катушку с медной проволокой. При каждом вводе или выводе магнита в катушку на концах ее обмотки наблюдалось возникновение электрического напряжения. Согласно закону электромагнитной индукции, величина возникающей электродвижущей силы прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через катушку и числу витков катушки.

Закон электромагнитной индукции определил путь развития электрических машин. Их главный принцип: чтобы получить быстрые изменения магнитного потока, надо вращать магнит при неподвижной катушке или, наоборот, вращать катушку при неподвижном магните. Именно так действовала первая электрическая машина,

изобретенная итальянцем Граммом более 100 лет назад и спустя примерно 50 лет после открытия Фарадеем электромагнитной индукции, — так называемое «Кольцо Грамма». «Кольцом» она была названа по той причине, что в качестве якоря имела тороидальное кольцо из тонких железных проволок, вращавшееся на оси в поле подковообразного постоянного магнита. На кольце крепилось несколько катушек из медной проволоки. Кольцо приводилось во вращение рукой с помощью ременной передачи.

Грамм не мог вращать магнит, поскольку 100 лет назад магниты должны были быть достаточно длинными. Теперь же новейшие магниты (типа РЗМ⁶) хорошо работают только при малой длине, поэтому конструктивно их просто привести во вращение. Речь идет преимущественно об электрических машинах малой мощности, когда желательно избежать применения коллектора или контактных колец. Это важно для машин, длительно работающих в тяжелых условиях эксплуатации, без частых осмотров и своевременной профилактики, например велогенераторов, генераторов для тракторов и т. п. Для волновых энергетических установок также удобнее бесконтактные генераторы, особенно для установок в открытом море.

Электрические машины в своем развитии прошли громадный путь, теория электрических машин — одна из наиболее разработанных глав современной электротехники. Но вращение якоря или ротора и сегодня остается основным принципом получения высокой скорости изменения магнитного потока и соответственно высокой электрической мощности, необходимой современной индустрии⁷.

Вместо вращательного или прямолинейного движений для получения электрической энергии можно применить также колебательное движение. Так (или почти так), как это делал Фарадей, только работу (движения) руки заменить работой волн. Мысль об использовании колебательного движения, естественно, возникает при поиске

⁶ РЗМ — редкоземельные магниты, или магниты на основе редких земель, — самые сильные (но хрупкие) постоянные магниты. Отечественные РЗМ сделаны на основе самария в соединении с кобальтом (SmCo_5).

⁷ Однако в наше время развиваются и иные способы получения большой электрической мощности, не обязательно связанные с вращательным движением. Например, МГД-генераторы не имеют вращающихся частей. Струя раскаленной плазмы с большой скоростью пронизывает сильное магнитное поле (силовые линии поля расположены по нормали к струе), в плазме индуцируется электрический ток, отводящийся с помощью системы электродов.

способов использования энергии поверхностных волн: как известно, волны являются самым наглядным примером колебательного движения.

Можно по-разному выполнить преобразователь для работы в колебательном режиме. Схема одного из простейших (макета) изображена на рис. 5. Приемником энергии волн здесь служит тонкая плоская плита (пластина) 1, в которую ударяют набегающие волны. Под давлением волн плита совершает колебания относительно горизонтальной оси 2. Ось может вращаться в подшипниках 3. До сих пор это устройство очень походило на первую волноэнергетическую установку в Ошен-Грове. Однако дальше начинаются серьезные различия.

Колебания плиты с помощью штанги 4 передаются не поршню гидравлического насоса, а генератору электрической энергии. Он размещен подальше от поверхности воды, поэтому потребовалась достаточно длинная штанга. Нижний конец штанги болтами скреплен с плитой, а на ее верхнем конце укреплена перемычка (ярмо) 5 из трансформаторного железа с двумя магнитами 6. Перемычка с магнитами является существенной частью колебательного генератора, она соответствует ротору или якору в обычном генераторе. Неподвижная часть генератора (статор) состоит из магнитопровода 7 П-образной формы, собранного из полосок тонкого трансформаторного железа. Применение трансформаторного железа для магнитопровода и перемычки необходимо для уменьшения потерь на вихревые токи. На вертикальных стержнях (частях) магнитопровода посажены две катушки 8, каждая имеет по 400 витков толстого медного изолированного провода. Катушки соединены последовательно и включены на общую нагрузку. Вся конструкция связана сварной рамой 9 из угловой стали (на ней укреплены и два подшипника скольжения, поддерживающие ось), которая крепится к причалу.

Под ударами волн плита периодически совершает колебания, т. е. качается. Качается и жестко связанная с ней штанга, поэтому перемычка с магнитами периодически замыкает и размыкает цепь магнитопровода. В тот момент, когда перемычка с магнитами замыкает магнитопровод, в нем появляется нарастающий магнитный поток, пересекающий витки обеих катушек. А когда волна продвигает плиту дальше, перемычка с магнитами размыкает магнитопровод, поэтому магнитный поток уменьшается, снова пересекая витки катушек. По закону электро-

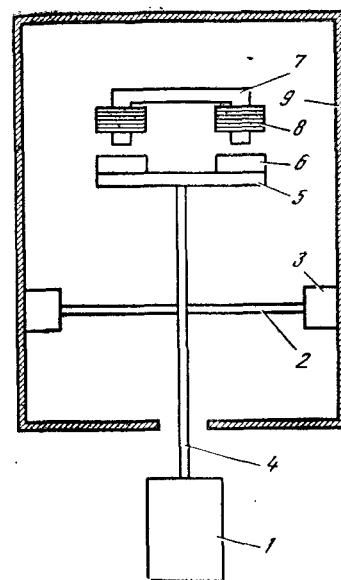


Рис. 5. Кинематическая схема преобразователя энергии поверхностных волн с колеблющимися магнитами и приемником энергии волн в виде пластины

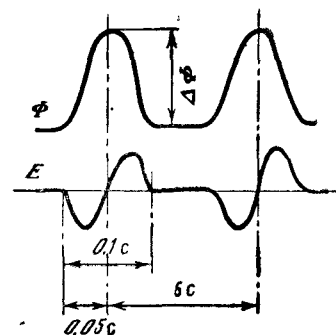


Рис. 6. Графики, поясняющие процесс индукции

(Φ—изменение магнитного потока в цепи магнитопровода, E—индуцированная электродвижущая сила)

магнитной индукции в обоих случаях в цепи катушек возникает электродвижущая сила, вызывающая электрический ток. Процесс индукции поясняется с помощью рис. 6.

В качестве примера оценим электрическую мощность, которая может быть получена в режиме колебаний с помощью описанного устройства при следующих условиях: период поверхностных волн $T=6$ с; амплитуда поверхностных волн $A=1$ м; размер постоянных магнитов в направлении качания перемычки (т. е. ярма) $b=0,05$ м (эта величина равна соответствующей стороне поперечного сечения магнитопровода); полное число витков на двух катушках $W_n=800$; максимальное значение магнитного потока через магнитопровод $\Phi=BS=1,7 \cdot 10^5$; максимальное значение индукции в сердечнике магнитопровода $B=8000$ Гс; площадь поперечного сечения магнитопровода $S=19,6$ см².

Определим время, в течение которого магнитный поток в сердечнике будет нарастать от начального значения,

близкого к нулю, до максимальной величины, принятой в расчете ($1,7 \cdot 10^5$ силовых линий). Нарастание потока начнется при подходе перемычки с магнитами к магнитопроводу и будет продолжаться до тех пор, пока она не встанет точно под ним. Совпадение проекций плоскостей поперечного сечения вертикальных стержней магнитопровода с плоскостями магнитов на перемычке будет соответствовать максимуму магнитного потока через сердечник; при дальнейшем движении перемычки магнитный поток будет уменьшаться.

При выходе перемычки с магнитами РЗМ за площадь проекций стержней магнитопровода магнитный поток снова примет значение, близкое к нулю. Для упрощения расчетов примем площади поперечного сечения стержней магнитопровода и магнитов РЗМ одинаковыми, а скорость движения перемычки неизменной и равной максимальной скорости орбитального движения частиц воды в волне при принятой амплитуде ($A=1$ м). Тогда длительность индукции, определяемая нами как время достижения магнитным потоком своего максимального или минимального значений, определится формулой

$$t = \frac{Tb}{2\pi A} = \frac{6 \cdot 0,05}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} = 0,1 \text{ с.}$$

Фактически оно будет несколько больше, так как рост магнитного потока начнется через воздушный зазор несколько раньше подхода кромки магнитов к краю стержня.

Вычислим максимальное значение электродвижущей силы, возникающей на концах обмотки при принятых условиях. Согласно формуле Максвелла, она будет равна

$$U_{\text{макс}} = -W \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cong -W \cdot \frac{\Phi}{t} = \\ = -\frac{8 \cdot 10^2 \cdot 1,7 \cdot 10^5 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^{-2}} = 27 \text{ В.}$$

Для определения мощности необходимо вычислить квадрат эффективного значения электрического напряжения за период поверхностной волны. Искомая величина определится выражением

$$U_{\text{эф}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{0,1} U_{\text{макс}}^2 \sin^2 \omega t dt,$$

где $\omega = 2\pi f = 62,8$ — угловая частота переменного тока, возбуждаемого в обмотках преобразователя (800 витков)

при колебаниях перемычки с постоянными магнитами РЗМ;

$$f = 1/2t = (2 \cdot 3,14 \cdot 0,05)^{-1} = 10 \text{ Гц.}$$

Чтобы вычислить квадрат действующего значения электрического напряжения за период поверхностной волны согласно приведенному выше интегралу, воспользуемся подстановкой

$$\sin^2 \omega t = 1/2 - 1/2 \cos 2\omega t = 1/2(1 - \cos 2\omega t).$$

Подставляя принятые выше значения, получаем

$$U_{\text{эф}}^2 = \frac{27}{6} \Big|_0^{0,1} (1 - \cos 2 \cdot 62,8 \cdot 0,1) = \frac{27^2 \cdot 0,1}{2 \cdot 6} = 6,1b^2.$$

Чтобы вычислить электрическую мощность, необходимо знать внутреннее сопротивление обмотки и сопротивление полезной нагрузки. Сопротивление обмотки преобразователя, состоящей из 800 витков медной проволоки диаметром 2,56 мм, равно примерно 1 Ом. Исходя из условия получения максимальной мощности, примем сопротивление полезной нагрузки также в 1 Ом; в этом случае суммарная электрическая мощность преобразователя

$$N_{\text{эл}} = 6,1/4 + 1 = 3,1 \text{ Вт.}$$

При равенстве сопротивления нагрузки внутреннему сопротивлению генератора электрический КПД преобразователя составляет 50 %. Следовательно, на полезной нагрузке выделится только половина от полученной цифры, т. е. всего 1,55 Вт.

По поводу этого расчета необходимо сделать несколько замечаний. Если правильно выбрать размеры плиты, то за один период поверхностной волны движимая ее энергией плита совершит два полуколебания.

Первое — при прохождении гребня в направлении его движения, второе — при прохождении ложбины волны, в этом случае направление движения плиты будет прямо противоположно направлению ее движения за счет гребня. Чтобы плита в действительности совершала эти колебания, ее размер по вертикали a_n должен быть достаточно велик и составлять не менее $2,5 A$ (где A — амплитуда поверхностной волны). Это условие определяется необходимостью иметь достаточную смоченную поверхность плиты во время прохождения ложбины волны. При его выполнении полезная электрическая мощность преобразователя удвоится, т. е. мы получим не 1,55, а около 3,1 Вт.

Фактически мощность была даже несколько больше при меньшей амплитуде поверхностных волн. Увеличение мощности произошло благодаря некоторым нелинейным эффектам, не учтенным в расчете⁸. Речь идет прежде всего о силе притяжения магнитов РЗМ к сердечнику преобразователя из трансформаторного железа. Сила эта достаточно велика; она не подчиняется закону синуса и зависит от многих параметров, в том числе от положения магнитов относительно сердечника. Существенную нелинейность вносит тангенциальная составляющая этой силы, изменяющаяся по направлению и величине от нуля до максимума при колебаниях перемычки с магнитами РЗМ под действием волн. Максимальная величина тангенциальной составляющей силы притяжения при применении двух магнитов РЗМ достигает 40 кг; цифра эта достаточно велика для маленького макета. Она сравнима по своей величине с силой давления волн на плиту, которая также не подчиняется гармоническому закону.

Оценим величину силы давления волн на плиту по формуле

$$F = K \rho_m S_n V^2,$$

где F — суммарная сила давления волн, кг; $K=1$ — коэффициент обтекания плиты (приближенное значение); $\rho_m=102 \text{ кгс}^2/\text{м}^4$ — массовая плотность воды; $S_n=0,5 \text{ м}^2$ — площадь плиты; $V_c=1 \text{ м/с}$ — горизонтальная составляющая волновой скорости;

$$F = 1 \cdot 102 \cdot 0,5 \cdot 1^2 = 50 \text{ кг}.$$

Расчет силы давления соответствует моменту, когда гребень волны набегае на плиту, стоящую неподвижно в положении равновесия. Принимается, что перед набегающей волной плита висит вертикально под действием силы тяжести и силы притяжения магнитов РЗМ к торцам сердечника; в этот момент тангенциальная составляющая силы притяжения магнитов равна нулю.

Расчет показывает, что при принятых параметрах величина силы волнового давления близка к силе статического притяжения магнитов. Если сила волнового давления по какой-либо причине уменьшится до 40 кг, то плита не

сдвинется заметным образом от положения равновесия и акта индукции не произойдет. Это может случиться, например, при прохождении ложбины волны, так как смоченная площадь плиты будет значительно меньше, чем во время прохождения гребня. Это свидетельствует о том, что у преобразователя имеется порог срабатывания по орбитальной скорости поверхностных волн; если горизонтальная составляющая орбитальной скорости и соответственно давление волн на плиту становятся ниже некоторой величины, то колебания плиты прекращаются. Поэтому

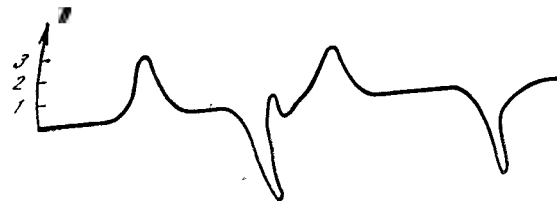


Рис. 7. Осциллограммы электрического напряжения, возникающего на нагрузке при колебаниях плиты под действием волн

процесс возбуждения электрических колебаний имеет существенно нелинейный характер, что подтверждается осциллограммой, приведенной на рис. 7. Осциллограмма показывает электрическое напряжение, зарегистрированное на омической нагрузке преобразователя во время его испытаний на морском причале. Импульсы электрического напряжения на нагрузке весьма далеки от синусоидальной формы кривой; они имеют сложную форму, причем большие импульсы чередуются с малыми, что объясняется сложной игрой нелинейных сил.

На осциллограмме, соответствующей одному периоду поверхностной волны, можно увидеть всего четыре относительно больших импульса электрического напряжения. Первый импульс (считая слева направо) соответствует выходу магнитов из-под торцов сердечника под давлением гребня подошедшей волны; максимальное значение напряжения достигает 3 В. После прохождения гребня давление волны на плиту ослабевает и она возвращается в положение равновесия; магниты входят под торцы сердечника. Процесс этот совершается быстрее их выхода, поэтому индуцируемое напряжение достигает примерно 4,5 В. Третий импульс соответствует второму выходу магнитов за счет прохождения ложбины волны, его максимальное значение напряжения достигает лишь 2,5 В. По

⁸ См.: Вершинский Н. В., Сидоренко А. А., Денисюк И. Н. Волновая электростанция с качающимся генератором. — В кн: Методы преобразования энергии океана. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1983, с. 81—86.

окончании прохождения ложбины плита и связанная с ней перемычка с магнитами снова возвращаются в положение равновесия, при этом возбуждается четвертый импульс величиной около 4 В.

Большие импульсы напряжения получаются, когда магниты входят в рабочий зазор сердечника. В этом случае направление момента тангенциальной составляющей силы притяжения магнитов совпадает с моментом силы тяжести плиты и штанги; кроме того, при окончании любой фазы волны (т. е. гребня или ложбины) направление момента силы давления от начинающейся новой фазы совпадает с моментами этих двух сил. Поэтому возрастает скорость движения магнитов, увеличивается скорость изменения магнитного потока через магнитопровод, возрастает индуцируемая ЭДС и напряжение на нагрузке. Пики напряжения меньшей величины всегда наблюдались при выходе перемычки с магнитами из положения равновесия. В этом случае момент тангенциальной составляющей силы притяжения противоположен моменту силы волнового давления. Естественно, что скорость движения магнитов меньше, меньше индуцируемая ЭДС и напряжение на нагрузке.

На осциллограмме рис. 7 после второго импульса можно увидеть еще два импульса малой амплитуды; их происхождение, возможно, связано с отраженными от берега волнами.

Во время проведения экспериментов отмечено влияние собственной частоты колебаний плиты на генерируемую мощность.

При более строгом анализе процесса преобразования энергии необходимо также учесть так называемую пондеромоторную силу (или силу Ампера). Она вызвана взаимодействием индуцированного тока в обмотках с магнитным полем возбуждающих магнитов. Пондеромоторную силу можно оценить по формуле

$$F_a = 1,02 BI 10^{-7} \text{ кг},$$

где B — магнитная индукция в зазоре, Гс; l — суммарная длина провода обмотки, см; I — ток через обмотку, А.

Расчет показывает, что в нашем случае значение силы F_a не превосходит 0,25 кг, поэтому в ориентировочном расчете ею можно пренебречь. Незначительность этой величины свидетельствует, в частности, о том, что у преобразователя имеются значительные возможности в смысле

увеличения генерируемой мощности. Этого можно достигнуть различными путями.

Например, для увеличения генерируемой мощности в 10 раз можно увеличить магнитный поток в $\sqrt{10}$, т. е. примерно в 3,16 раза; для этого потребуются два магнита РЗМ площадью по 60 см². При выполнении этого условия легко получить мощность в 30—40 Вт. Такой мощности вполне достаточно для обеспечения энергоснабжения навигационного буя или буя для передачи информации о гидрофизических параметрах океана. Для увеличения мощности в 100 раз, т. е. для получения 300—400 Вт, магнитный поток при всех остальных неизменных данных потребуется увеличить в 10 раз; этого можно добиться применением нескольких пар магнитов РЗМ вместо одной. Такой способ удобнее, так как позволяет ввести автоматическую компенсацию силы статического притяжения магнитов, что облегчит условия работы преобразователя и позволит говорить о создании генераторов такого типа мощностью до нескольких десятков киловатт.

Вопрос стоит о цене киловатта в зависимости от размеров установки. Преобразователи этого типа отличаются простотой, но дорога основная часть — магниты РЗМ. Возможная область их применения — малая энергетика, т. е. небольшие силовые установки для отдельных ферм, рыбозаводов или совхозов, расположенных вблизи побережья. Основное преимущество устройств подобного типа — предельная простота устройства. Они вполне соответствуют второму типу преобразователей приведенной выше классификации. Преобразование идет по короткой схеме: волны — механический приемник энергии волн — генератор электрической энергии; эта схема отличается от идеальной (схемы I) введением лишь одного элемента — приемника энергии в виде плиты.

Одна из особенностей преобразователей с колебательным движением заключается в необходимости применения постоянных магнитов типа РЗМ (с другими известными ныне типами постоянных магнитов нужного эффекта не получится из-за недостаточности их остаточной индукции), но РЗМ — относительно дороги и дефицитны, что скажется на их применении.

Для нормальной работы преобразователей рассмотренного типа необходимо иметь неподвижное основание, на чем можно было бы укрепить раму, поддерживающую горизонтальную ось, относительно которой колеблется плита со штангой и магнитами. Подобное требование не всегда

можно выполнить в условиях открытого моря, однако имеются способы обойти это затруднение. Первый из них заключается в применении якоря. Он может обеспечить достаточную неподвижность одной из частей преобразователя, относительно которой будет колебаться вторая часть, несущая магниты или обмотки. В этом случае конструкция преобразователя должна несколько измениться. Еще лучше вместо якоря использовать стабилизированный буй (типа «вехи Фруда») с достаточной плавучестью. Можно решить эту задачу и на принципиально ином физическом принципе, используя силы инерции вместо прямого давления волн на плиту.

Описанный преобразователь динамоэлектрического типа в колебательном режиме дает переменный ток, частота которого колеблется так же, как и его эффективное значение. Непосредственная подача такого тока потребителям вряд ли окажется приемлемой, поэтому перед подачей его параметры должны быть улучшены. Проще всего это сделать с помощью аккумулятора того или иного типа.

ИНЕРЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КАЧКИ

Качка судов одно из самых ярких проявлений энергии морских волн. Все суда, маленькие и большие, испытывают качку. Большое судно, качающееся на волнах, обладает весьма значительным запасом колебательной энергии: мощность качки судна может превышать мощность его главных двигателей. Оценим мощность, развиваемую при качке судами типа «Академик Курчатов». Для подсчета воспользуемся формулой

$$N = 2m_0 g H / T \text{ Вт,}$$

где $m_0 = 6800 \text{ т}$ ($6,8 \cdot 10^6 \text{ кг}$) — масса судна, равная его водоизмещению; $H = 1 \text{ м}$ — высота подъема центра тяжести судна на волне; $T = 10 \text{ с}$ — период колебаний судна;

$$N = \frac{2 \cdot 6,8 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 1}{10} = 1,36 \cdot 10^7 \text{ Вт} = 13600 \text{ кВт.}$$

Суммарная мощность двух главных двигателей судов типа «Академик Курчатов» равна 8000 л. с., или около 6000 кВт. Следовательно, мощность качки более чем вдвое превышает мощность его главных дизелей.

Расчет показывает причину давнего интереса ученых и изобретателей к использованию энергии качки для по-

лучения электрической энергии или для движения самого судна. Пятьдесят лет назад академик В. В. Шулейкин писал: «Конструктор заставляет волны поднимать и опускать какой-то поплавочек достаточных размеров, поступательное движение которого передается насосным поршнем»⁹. Но за прошедшее с тех пор время никому не удалось найти практически пригодный способ преобразования энергии качки достаточно большого судна в электроэнергию, несмотря на очевидную выгоду решения этой задачи. Ведь морские суда подвергаются качке в течение всего срока своей жизни, достигающего нескольких десятилетий. Развитие волновой энергетики пошло по линии разработки особых конструкций мощных поплавков, энергия качки которых преобразуется в электроэнергию с помощью гидравлических систем (например, «утка» Солтера или «плот» Коккереля).

Известны также работы, имевшие целью использование энергии качки для движения самого качающегося судна. В Советском Союзе и за границей проведены успешные опыты по использованию качки небольшого судна для привода его ходового винта или другого типа двигателя. Было интересное сообщение о работе шведского изобретателя Г. Дальстрема, построившего катер без мотора и парусов¹⁰. В подводной части корпуса этого необычного катера размещен свободно подвешенный груз-балансир весом около тонны. Под воздействием качки на морской волне балансир совершает колебательные движения, с помощью системы зубчатых передач преобразуемые во вращение гребного винта. На относительно сильном волнении ожидалось получение мощности порядка 18 л. с., что должно было обеспечить скорость движения катера около 7 узлов. Дальстрем провел серию испытаний на небольшой шлюпке, снабженной балансиром весом около 200 кг, и достиг скорости в 4 узла.

В другой информации по этому вопросу¹¹ сообщалось, что канадец И. А. Гаузе построил лодку, передвигающуюся без помощи весел, паруса или механического двигателя. На форштевне, у миделя и в корме в подводной части закреплены металлические плавники, которые под действием качки лодки на волнении двигают ее вперед. Испытания

⁹ Шулейкин В. В. Физика моря. М.: ОНТИ, 1938; т. 2, с. 314.

¹⁰ См.: О пользе качки. — Катера и яхты, 1970, № 2 (24), с. 42.

¹¹ См.: Два варианта судна без паруса и мотора. — Катера и яхты, 1969, № 4 (20), с. 29.

проводились на озеро Онтарио. В течение 12 ч Гаузе ходил на лодке по озеру против волны, вдоль волны и по волне. При легком волнении была достигнута скорость 3 узла, но в открытом море изобретатель рассчитывает получить 7 узлов. Лучшее всего лодка идет против волны.

Принцип работы плавников, запатентованный автором, таков: три плавника прикреплены своей передней частью к килю лодки. Носовая часть плавников жесткая, а кормовая — эластичная. При качке лодки погруженные в воду плавники приходят в движение — колеблются вверх и вниз. При этом их кормовые концы деформируются так, что происходит отталкивание массы воды назад, вследствие чего создается реактивный упор и лодка движется вперед. Длина лодки — 12 м. Корпус ее изготовлен из нескольких слоев синтетической ткани, натянутой на жесткий каркас. Обводы и размерения корпуса выбраны с учетом наименьшего сопротивления движению.

Эти опыты — свидетельство целесообразности разработки инерционного преобразователя и для преобразования энергии поверхностных волн в электрическую энергию. Использование инерционных сил, возникающих при качке какого-либо корпуса (судна), представляется перспективным в сочетании с генератором электрической энергии, работающим в колебательном режиме. Речь идет об устройстве, похожем на описанное в предыдущем разделе, где для преобразования энергии поверхностных волн применялась плита, колебавшаяся под действием динамического давления проходящих волн. Теперь речь идет об использовании некоторой инертной массы, которая совершает вынужденные периодические колебания аналогично колебаниям плиты. Передача возбуждающих импульсов будет происходить через точку подвеса, следовательно, для массы со штангой и магнитами на другом конце не требуется непосредственного контакта с волной, необходимый контакт осуществляется корпусом, в который заключаются все устройство. Именно корпус воспринимает энергию волн и передает ее маятнику, состоящему из инертной массы на одном конце и перемычки с магнитами РЗМ — на другом. Подобный приемник энергии волн имеет ряд преимуществ перед другими видами энергоприемников для малой энергетики.

К числу преимуществ инерционного преобразователя подобного типа относятся следующие: он не требует жесткого основания для своего монтажа, его не надо ориентировать по фронту волн — он делает это сам автомати-

ческий, наконец, его внутренность легко герметизировать, что освобождает электрический генератор от нежелательного контакта с морской водой и ее брызгами. Последнее обстоятельство важно с точки зрения надежности устройства.

Практический интерес представляет вопрос о мощности, которую можно получить с инерционного преобразователя в реальных условиях. Для ответа на этот вопрос оценим энергию, которую можно снять с маятника, совершающего незатухающие колебания с амплитудой $\pm 30^\circ$. Для расчета воспользуемся формулой

$$N = 0,275 m g^{3/2} l_m^{1/2} \text{ Вт},$$

где l_m — длина подвеса физического маятника (м), $g^{3/2} = 31,6$. Эта формула получена из предыдущей формулы подстановкой в нее значения периода собственных колебаний физического маятника $T = 2\pi \sqrt{l_m/g}$.

Для успешной работы инерционного преобразователя период собственных колебаний его маятника должен находиться в пределах спектра энергонесущих частот волн района постановки. Для ориентировочного подсчета зададимся собственным периодом колебаний маятника преобразователя равным 6 с, в этом случае длина его плеча должна быть около 9 м. Примем колеблющуюся массу равной 1 т ($m_m = 1000$ кг). Тогда кажущаяся мощность подобного маятника без учета потерь

$$N = 0,275 \cdot 10^3 \cdot 31,6 \cdot 3 = 26 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 26 \text{ кВт}.$$

Заметим, что вычисленная цифра представляет реактивную мощность. Из теории колебаний известно, что с колебательной системы в цепи генератора незатухающих колебаний можно снять достаточно большую полезную мощность. Из радиотехнической практики известно, что КПД генераторов электромагнитных колебаний достигает 80—90 %. Однако поверхностные ветровые волны не обладают строгим постоянством частоты колебаний, обычно свойственным электромагнитным колебаниям. Поэтому условия работы гравитационного маятника, возбуждаемого силовыми импульсами поверхностных волн, будут тяжелее условий работы электромагнитного контура, подпитываемого строго периодическими импульсами тока. Из-за отсутствия строгой периодичности возбуждающих импульсов амплитуда колебаний гравитационного маятника в поле ветровых волн будет несколько меняться во времени, уменьшаясь при задержке в подходе очередной волны.

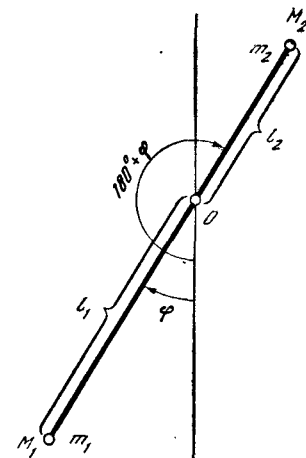
Неизвестно точно, сколько в таких условиях можно снимать полезной мощности. Выбор оптимальной нагрузки зависит от статической обеспеченности волн расчетного периода в данном районе.

Наш маятник приближается к условиям работы пассивного контура, когда полезная нагрузка не должна превышать 0,5 реактивной мощности контура, а практически обычно составляет значительно меньшую цифру. Следовательно, можно реально использовать менее 13 кВт. Но главный недостаток состоит в том, что масса в 1 т, раскачиваемая на плече длиной около 9 м, представляет собой громоздкую конструкцию, опасную для всех окружающих — монтажников, наладчиков, инженеров. Для увеличения снимаемой с подобного маятника мощности в 10 раз при той же длине плеча ($l_x = 9$ м) колеблющуюся массу придется увеличить также в 10 раз, т. е. довести до 10 т. А чтобы получить мощность порядка 1 мВт, массу маятника надо увеличить более чем в 100 раз при той же амплитуде колебаний ($\pm 30^\circ$) и неизменной длине плеча (9 м). В этом случае, очевидно, потребуется применение электрического генератора другого типа.

Но 100 т — это большая масса, почти 13 м³ стали, водоизмещение целого судна — малого сейнера. Выполненные расчеты подтверждают положение о том, что еще не найден удобный способ преобразования энергии качки обычных судов в электрическую энергию. Если мы хотим воспользоваться энергией волн для движения самого судна, то, видимо, лучше всего пока сделать так: судно буксирует за собой цепочку, скажем, «уток» Солтера, электрическая энергия которых питает ходовой электродвигатель буксира.

В любом из рассмотренных случаев практическое применение инерционных преобразователей затруднительно из-за большой длины плеча, необходимой для обеспечения собственной частоты колебаний маятника в диапазоне энергонесущих частот поверхностных волн, вытекающей отсюда громоздкости конструкции и связанной с ней малой надежностью и опасностью для обслуживающего персонала. Относительно легко инерционным способом можно получить лишь небольшие мощности — порядка десятков, в лучшем случае сотен ватт. Например, маятник массой 200 кг с плечом 0,8 м при колебаниях в пределах $\pm 30^\circ$ имеет энергию ~ 200 Дж и обладает реактивной мощностью (без учета потерь) около 220 Вт; цифра эта получается при периоде собственных колеба-

Рис. 8. Схема двухплечевого маятника



ний (маятника) около 1,8 с, что далеко от периода энергонесущих волн.

Некоторые из отмеченных недостатков можно преодолеть с помощью особого двухплечевого маятника (рис. 8). Его можно выполнить с практически вполне приемлемыми размерами с учетом фактически наблюдающегося диапазона периодов поверхностных волн. Маятник имеет две массы, расположенные на одной прямой по разные стороны от оси вращения O. Для второй массы m_2 вместо угла φ взят угол $\varphi + 180^\circ$. Но $\sin(180^\circ + \varphi) = -\sin \varphi$. Поэтому уравнение движения такого маятника будет

$$I_x \ddot{\varphi} = g m_1 l_1 \sin \varphi - m_2 l_2 g \sin \varphi,$$

где I_x — суммарный момент инерции маятника с двумя массами, m_1 и m_2 — точечные массы.

Предполагая колебания маятника малыми, приближенно примем $\sin \varphi = \varphi$. Тогда

$$I_x = m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2.$$

После подстановки значения момента инерции уравнение движения маятника

$$(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2) \ddot{\varphi} = g (m_1 l_1 - m_2 l_2) \varphi,$$

откуда собственная круговая частота малых колебаний двухплечевого маятника может быть найдена по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(m_1 l_1 - m_2 l_2) g}{m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2}}.$$

Полученная формула показывает, что, изменяя параметры $m_1 l_1$ и $m_2 l_2$, можно получить практически любое значение собственной круговой частоты колебаний такого маятника при вполне приемлемых для практики габаритных размерах. Отметим, однако, что значения l_1 , l_2 , m_1 и m_2 не могут быть выбраны совершенно произвольно. Необходимо, чтобы всегда соблюдалось условие $m_1 l_1 > m_2 l_2$.

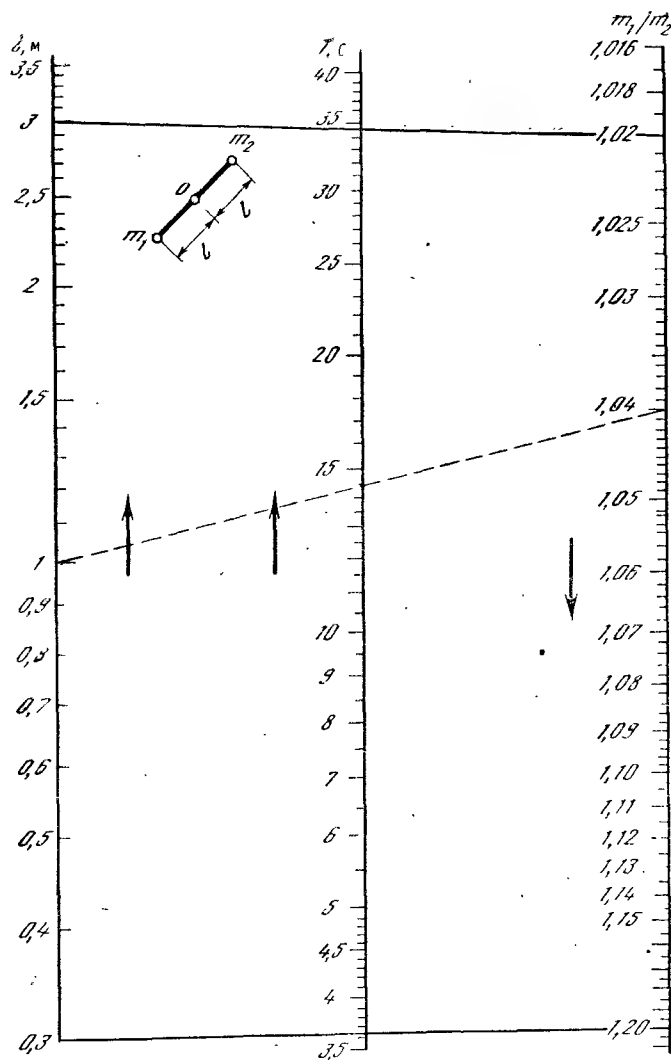


Рис. 9. Номограмма И. Н. Денисюка для расчета двухплечевого маятника

В предельном случае, когда $m_1 l_1 = m_2 l_2$, колебательное движение масс маятника превращается в аperiодическое, т. е. система придет во вращение, которое будет постепенно замедляться; этот случай для нас интереса не представляет, как и случай, когда $m_1 l_1 < m_2 l_2$.

Для облегчения расчетов И. Н. Денисюком построена номограмма, приведенная на рис. 9, позволяющая быстро находить период собственных колебаний двухплечевого маятника по выбранным значениям m_1 , m_2 , l_1 и l_2 .

Период собственных колебаний определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2}{g (m_1 l_1 - m_2 l_2)}}.$$

При построении номограммы принято, что плечи маятника одинаковы, т. е. $l_1 = l_2 = l$. На левой вертикальной шкале отложены значения длины плеч в пределах от 0,3 м до 3,5 м, на правой — отношения m_1/m_2 в пределах от 1,016 до 1,25. Средняя шкала предназначена для определения искомого периода колебаний T ; диапазон его возможных значений составляет от 3,5 до 40 с. При $l = 1$ м, $m_1/m_2 = 1,04$ период собственных колебаний маятника будет составлять 14,3 с. Отношение $m_1/m_2 = 1,04$ легко получить, если принять $m_1 = 104$ кг, $m_2 = 100$ кг; выбор абсолютных значений колеблющихся масс будет определяться необходимой мощностью.

Важно отметить, что большой период собственных колебаний маятника (14,3 с) получен при скромных размерах — длина плеч взята всего по 1 м. Если ограничиться собственным периодом колебаний маятника около 8 с, то при отношении $m_1/m_2 = 1,08$ длина каждого из плеч должна быть всего 0,6 м, т. е. маятник имеет достаточно компактные размеры в рабочем диапазоне частот морских волн.

Здесь уместно отметить еще одну важную особенность работы маятника в поле гравитационных волн. Речь идет об увеличении ширины его резонансной кривой, возникающей при движении маятника в инерционной системе. Имеются в виду колебания маятника на качающемся бую. Пусть на ось маятника действуют ускорения, являющиеся случайными функциями времени. Выберем систему координат, жестко связанную с испытывающим качку буюм, на котором установлен маятник; пусть ось Y направлена вертикально, а ось X — горизонтально. В этом случае уравнение движения маятника можно записать в виде

$$I_x \ddot{\varphi} + [(m_1 l_1 (g + n_y) - m_2 l_2 (g - n_y))] \sin \varphi + + n_x (m_1 l_1 - m_2 l_2) \cos \varphi = 0,$$

где n_y , n_x — случайные вертикальные и горизонтальные компоненты ускорения.

Поделим все члены уравнения на I_z и после преобразований получим

$$\ddot{\varphi} + [\omega_0^2 + D(t)] \sin \varphi + M(t) \cos \varphi = 0,$$

где

$$D(t) = \frac{(m_1 l_1 - m_2 l_2) n_y}{I_z},$$

$$M(t) = \frac{n_x (m_1 l_1 - m_2 l_2)}{I_z}.$$

Величина n_y изменяется в пределах

$$-A\Omega^2 < n_y \leq A\Omega^2,$$

где A — амплитуда волны; Ω — частота волны.

При среднем периоде волн 2,4 с и высоте 30 см имеем

$$-0,25 \text{ м/с}^2 \leq n_y \leq 0,25 \text{ м/с}^2,$$

$$-1,5 \leq D(t) \leq 1,5.$$

Отсюда можно определить добротность маятника в данных условиях:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_0} = \frac{\omega_0}{2\sqrt{D(t)_{\max}}} \approx 4.$$

Полученное значение показывает, что возбуждение колебаний маятника может происходить в достаточно широком спектре частот поверхностных волн. Поэтому для получения максимальной мощности на нагрузке не требуется точной настройки маятника на частоту возбуждающих волн. Вывод этот важен, поскольку осуществить точную настройку практически невозможно из-за случайного характера волновых процессов на поверхности океана. Отметим еще, что нагрузка на маятник дает дополнительное увеличение ширины резонансной кривой.

С целью проверки теоретических расчетов был построен действующий макет двухплечевого маятника со следующими параметрами: $m_1 = 2$ кг, $m_2 = 1$ кг, длина плеч $l_1 = l_2$ могла изменяться в пределах от 50 до 170 мм. Для регистрации колебаний маятника с его осью связали ось пружинного сопротивления 100 Ом (типа ППБ-2В-167). На концы сопротивления подавался ток от маленькой батарейки, а с подвижного контакта снималось напряжение на перьевой самописец (типа Н-327), частотная характеристика которого позволяла регистрировать практически без искажений наблюдавшиеся процессы.

При проведении морских испытаний маятник поме-

щался на свободно плававший буй, в качестве которого использовалась стальная бочка диаметром 60 см, высотой 90 см, на дно которой был уложен балласт так, что при отсутствии волнения бочка плавала в вертикальном положении. Для увеличения высоты метacentра снизу к дну были приварены ножки. При этих условиях осадка бочки составляла около 30 см. Собственный период колебаний этого импровизированного буя по вертикали был около 1 с, а период угловых колебаний — около 2 с. Испытания велись в бухте при волнении со средним периодом около 2,4 с.

Осциллограммы показали, что максимальная амплитуда колебаний маятника получается при настройке его на собственный период около 1,8 с, что соответствует развитым представлениям. Во время испытаний наблюдался любопытный физический эффект: близость периодов вертикальных и угловых колебаний бочки к среднему периоду поверхностных волн порождала сравнимые по величине амплитуды ее вертикальных и угловых колебаний. Это обстоятельство увеличивает корреляцию между случайными функциями $D(t)$ и $M(t)$, что вызывает появление некоторой постоянной составляющей в угле отклонения φ при нулевых средних возмущениях $D(t)$ и $M(t)$ ¹². Среднее отрицательное отклонение бочки больше, чем положительное, т. е. наблюдается что-то наподобие хорошо известного в радиотехнике эффекта детектирования. Обнаруженный эффект необходимо учитывать при выборе положения статора электрогенератора. В описываемых экспериментах постоянная составляющая угла отклонения достигала примерно 5°.

Таким образом, опыты показали, что инерционный преобразователь в виде двухплечевого маятника пригоден для получения небольших мощностей электрической энергии.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Широкую известность получил преобразователь энергии поверхностных волн, предложенный английским изобретателем Солтером, часто называемый «утка Солтера» за форму корпуса, напоминающую сидящую на воде утку. Эта конструкция обладает способностью весьма эффективно

¹² См.: Егланов Л. Г., Константинов В. М. Системы со случайными параметрами. М.: Наука, 1976, с. 21—23.

поглощать энергию поверхностных волн — используется до 90 % энергии приходящих волн, за «уткой» остается почти ровная поверхность воды. Следовательно, цепочка подобных преобразователей сможет не только вырабатывать электрическую энергию, но также будет служить эффективным волноломом. Несомненно, во многих случаях сочетание этих двух качеств представит определенный интерес, так как позволит решить проблему защиты берегов, подвергающихся абразии, и, кроме того, одновременно получать электрическую энергию.

Важной особенностью конструкции Солтера является необходимость одновременного использования нескольких десятков «уток» (не менее 20—30 штук), соединенных общей осью; суммарная длина цепочки из них получается около мили. Такой же длины требуется и общая ось (большое число поплавков и длина оси являются естественным результатом применения законов статистики для стабилизации оси). Только при выполнении этого условия система Солтера сможет работать: колебания корпусов («уток») под действием волн относительно общей неподвижной оси могут быть использованы для привода насосов, нагнетающих рабочую жидкость в гидравлические аккумуляторы, откуда она пойдет в турбины или гидравлические моторы, вращающие генераторы электрической энергии. Если число поплавков и длина оси будут малы, то сумма вращающих моментов на ось от отдельных поплавков не будет равна нулю, ось будет совершать беспорядочные рывки и выработка электрической энергии прекратится.

Отсюда вытекает главный недостаток системы Солтера — трудность практического осуществления. На общую ось длиной в милю ляжет громадная нагрузка. Чтобы обеспечить ее прочность, запроектирован диаметр оси в 15 м. Исходя из максимальной мощности волн 500 кВт/м. Но волны бывают и более сильные — иногда мощностью до 1000 кВт/м и выше. Поэтому прочность системы Солтера вызвала сомнение у экспертов и в 1982 г. финансирование этой разработки английским правительством было прекращено.

Однако недостаток конструкции Солтера можно преодолеть, если отказаться от использования статистических закономерностей для стабилизации оси, а применить законы физики, не связанные со статистикой: речь идет о гидродинамической стабилизации оси, основанной на явлении присоединенной массы.

Как известно, всякое тело, погруженное в жидкость,

приобретает некоторую дополнительную массу, обнаруживающуюся при всех перемещениях тела. Эта дополнительная масса обычно называется присоединенной, ее значение зависит от геометрии тела. Тела хорошо обтекаемой формы приобретают меньшую присоединенную массу; наоборот, плохо обтекаемые тела имеют значительную присоединенную массу. Точный расчет присоединенной массы для тел различной формы достаточно сложен. Известны ее значения для тел распространенных форм. Например, для шара, погруженного в воду, присоединенная масса составляет 50 % массы вытесненной им воды, а для плоского квадратного щита она примерно равна массе шара, который может быть описан вокруг этого щита и заполнен водой.

Если опустить щит в воду на некоторую глубину, то момент инерции подобной системы относительно горизонтальной оси, находящейся на уровне свободной поверхности воды, будет достаточно большим и его можно использовать для стабилизации оси. Стабилизированная подобным образом ось может применяться в любой колеблющейся системе тел в качестве неподвижной основы, т. е. некоторого фундамента, необходимого для обеспечения нормальной работы насосов или любых других механизмов в системе преобразователя. Подобная инерционная стабилизация может с успехом заменить статистическую стабилизацию, предложенную Солтером.

Обязательным условием успешной работы гидродинамического способа стабилизации является выполнение требования

$$M_{\text{щ}} \gg M_{\text{к}},$$

где $M_{\text{щ}}$ — момент инерции щита с крепящей его рамой и присоединенной к ним массой воды; $M_{\text{к}}$ — момент инерции колеблющегося корпуса со всеми деталями, находящимися в нем.

Рассматривая погруженный в воду щит с присоединенной к нему массой воды и колеблющийся на поверхности корпус как связанные системы, согласно закону сохранения момента количества движения можно написать

$$M_{\text{щ}} \omega_{\text{щ}} = M_{\text{к}} \omega_{\text{к}},$$

где $\omega_{\text{щ}}$ — угловая скорость колебаний щита; $\omega_{\text{к}}$ — угловая скорость колебаний корпуса.

Угловую скорость колебаний щита найдем по формуле

$$\omega_{\text{щ}} = M_{\text{к}} \omega_{\text{к}} / M_{\text{щ}}.$$

Примем, что щит жестко связан с горизонтальной осью так, что угловая скорость колебаний оси равна угловой скорости колебаний щита. Будем также считать, что горизонтальная ось, жестко связанная со щитом, одновременно служит осью, вокруг которой совершаются колебания корпуса за счет энергии поверхностных волн. Форма корпуса предполагается оптимальной для максимального отбора энергии. По ходу нашего расчета сейчас нам важен лишь собственный момент инерции корпуса. С точки зрения наилучшей работы рассматриваемого способа гидродинамической стабилизации желательно, чтобы корпус имел минимальную величину собственного момента инерции, но при слишком малом моменте инерции нельзя получить нужную мощность.

Исходя из требования получения от колеблющегося корпуса заданной мощности, величина его массы не может быть ниже некоторого минимального значения, что практически ограничивает также и минимальное значение момента инерции корпуса. Для нормальной работы механизмов, преобразующих периодические колебания корпуса во вращательное движение (какими бы они не были), необходимо, чтобы

$$\omega_{\text{оси}} = \omega_{\text{щ}} \ll \omega_{\text{к}},$$

где $\omega_{\text{оси}}$ — угловая скорость колебаний горизонтальной оси.

Угловую скорость колебаний корпуса примем равной угловой скорости колебаний поверхностных волн, т. е.

$$\omega_{\text{к}} = 2\pi f = 2\pi/T,$$

где T — период поверхностных волн, энергия которых подлжет преобразованию; $f=1/T$ — частота поверхностных волн.

Следовательно, для энергонесущих компонентов волн с периодом от 6 до 12 с угловая скорость колебаний корпуса будет изменяться в пределах от 1 до $0,5 \text{ с}^{-1}$. Поэтому угловая скорость колебаний щита должна быть минимум на порядок меньше, т. е. составлять не более $0,05$ — $0,1 \text{ с}^{-1}$. Для выполнения этого условия отношение моментов инерции щита и корпуса должно быть не менее 10, а еще лучше — несколько больше.

Чтобы показать реальную возможность выполнения этого условия, сделаем следующий подсчет. Пусть щит имеет размер $3 \times 3 \text{ м}$. Присоединенную к нему массу воды примем равной объему шара с радиусом $r=1,5 \text{ м}$. Тогда

присоединенная к щиту масса воды $m_{\text{ш}} = 4/3\pi r^3 \rho = 3375 \text{ кг} = 3,375 \cdot 10^3 \text{ кг}$, где ρ — плотность воды (1000 кг/м^3), середина щита заглублена на 10 м — эта величина достаточно для волнового режима прибрежных районов Черного моря.

Из теории поверхностных волн известно, что затухание амплитуды волн с глубиной происходит по экспоненциальному закону. Показатель экспоненты зависит от длины волны и глубины. На глубине, равной половине длины поверхностной волны, ее амплитуда составляет примерно 0,002 от амплитуды волн на поверхности. Для выполнения этого условия при длине волн на поверхности 20 м достаточно погрузить щит на глубину 10 м; при волнах длиной в 100 м потребуются глубина погружения в 50 м. Обе эти цифры (10 или 50 м) не вызывают практических затруднений. Оценим значение момента инерции для минимального заглубления середины щита.

Момент инерции щита с присоединенной к нему массой воды для заглубления в 10 м

$$M_{\text{щ}} = m_{\text{ш}} \cdot 10^2 \simeq 3,4 \cdot 10^5 \text{ кгм}^2.$$

Фактически он будет несколько больше, так как в расчете не учтены масса рамы, присоединенная к ней масса воды и масса самого щита. При необходимости эту величину легко увеличить на несколько порядков. Полученное значение момента инерции щита с присоединенной к нему массой воды для выполнения условия стабилизации позволяет иметь корпус с моментом инерции менее $3,4 \cdot 10^5 \text{ кгм}^2$.

Возьмем стальной цилиндр диаметром 2,5 м (по средней линии обшивки), массой 4000 кг, включающей массу всех деталей преобразователя. Его момент инерции

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} r_{\text{к}}^2 = 4 \cdot 10^3 (1,25)^2 = 6,2 \cdot 10^3 \text{ кгм}^2,$$

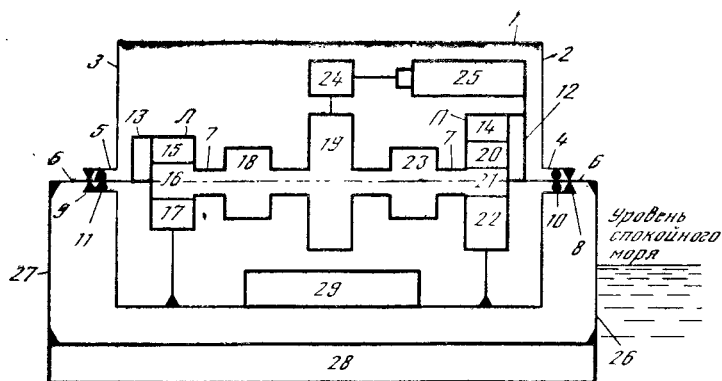
где $r_{\text{к}}$ — радиус момента инерции, принятый равным 1,25 м.

Размеры корпуса соответствуют макету, рассчитанному на получение мощности 0,5—1 кВт. Практически момент инерции корпуса будет меньше расчетной цифры, так как часть его массы находится на меньшем радиусе от оси корпуса, чем принято в расчете (1,25 м).

Отношение моментов инерции щита и корпуса

$$M_{\text{щ}}/M_{\text{к}} = 3,37 \cdot 10^5 / 6,2 \cdot 10^3 = 50.$$

Расчет показывает, что угловая скорость колебаний щита и, следовательно, оси, к которой он жестко прикреплен, примерно в 50 раз меньше скорости угловых колебаний



корпуса. Практически это означает, что ось будет неподвижна и щит может использоваться в роли стабилизатора.

Можно обойтись и без гидравлики, применив чисто механическую систему преобразования. Кинематическая блок-схема устройства для преобразования энергии ветровых волн и зыби в электрическую энергию представлена на рис. 10.

подшипниками 10 и 11, находящимися во втулках 4 и 5. Кроме того, имеется трубчатая ось 7, свободно сидящая на оси 6 внутри корпуса 1 на участке между шестернями 16 и 21. Внутри корпуса 1 на оси 6 установлены две жесткие стойки 12 и 13, на которых укреплены оси шестерней 14 и 15, являющихся частями двух планетарных редукторов Л и П (левого и правого).

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЦИОЛКОВСКОГО И КОККЕРЕЛЯ

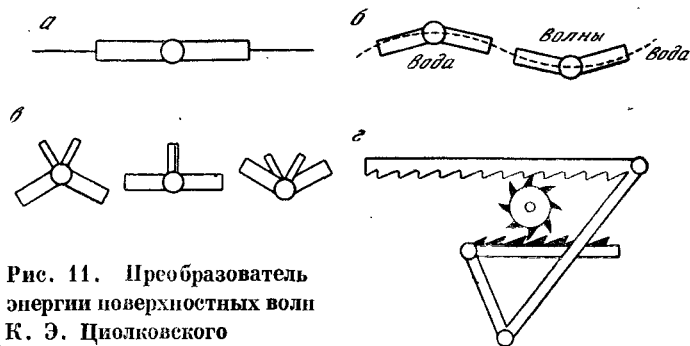


Рис. 11. Преобразователь энергии поверхностных волн К. Э. Циолковского

Петли приводят в колебательное движение приложенные к ним стержни (рис. 11, б). Последние с помощью зубчатых полос вращают зубчатое колесо всегда в одну сторону; сами они вследствие наклона зубцов (рис. 11, в) скользят в противоположную сторону. Это приспособление работает только при одном направлении качания стержней. При обратном направлении ход их холостой. Но на той же оси могут быть расположены другая пара стержней, зубчатых полос и колеса, но с обратным наклоном зубцов, что дает возможность колесам и оси вращаться благодаря инерции маховика, насаженного на ту же ось. Тогда при движении зубья колес с треском соединяются с зубьями стержней. Как велика может быть получаемая таким путем работа, насколько она ослабляет волнение и насколько экономична машина, — может показать только опыт.

Возможно, что эти волноломы смогут быть использованы не только для укрощения волнения, но и как даровая энергия при движении судов и для других целей.

Огромные суда — плоты — приюты для аэропланов и дирижаблей среди океанов — могли бы быть полезны также и для погибающих от бури судов¹³.

А в 70-х годах в печати появились сообщения о «плоте» Коккереля. Известный английский изобретатель Кристофер Коккерель предложил устройство для использования энергии волн, внешний вид которого должен «напоминать корабль со сломанной кормой». Кораблестроители проектируют суда, чтобы такого не случилось. Мы же от-

толкнулись от противоположной идеи». Идея та же, что и у Циолковского, чтобы судно ломалось на волне, точнее, изгибалось на особых шарнирах. Вот как описывает конструкцию Коккереля Дэвид Росс: «Сооружение, известное как плот Коккереля, представляет шарнирную цепочку понтонов. Для удобства все зовут ее «плот». Первоначально предполагалось, что отдельный модульный плот составят семь понтонов... В настоящее время модульный плот составляют три, иногда даже два понтона. Проектная линия из таких модулей может достигать 1000 км.

Плот принимает очертания поверхности моря. Передний понтон свободно движется вверх и вниз, подчиняясь колебаниям волн. Движения второго понтона более ограничены, ибо поверхность вод под ним становится более пологой после того, как большую часть энергии волны перехватит первый понтон. Третий понтон в цепочке вдвое длиннее первых двух и относительно устойчивее. Таким образом, трио движется в различных фазах, что составляет функциональный принцип конструкции.

Каждое шарнирное крепление через два длинных шатуна и специальные рычаги соединено с поршнями внутри гидравлических цилиндров. Движение плота заставляет поршни, двигаясь вперед и назад, перекачивать жидкость в изолированной замкнутой системе... Протекая по трубе, она попадает на гидравлический мотор... Свою энергию он (мотор) передает генератору, вырабатывающему электричество»¹⁴.

Итак, плот, составленный из трех, а иногда даже двух понтонов. Чем эта система отличается от «петли» К. Э. Циолковского? Практически ничем, она также состоит из двух звеньев — понтонов. Существенно отличается механизм передачи энергии от колеблющихся звеньев плота к генератору электрической энергии. Коккерель применяет гидравлическую передачу, это — вполне современный способ решения задачи. Но гидравлическая передача требует квалифицированного обслуживания. Сам Коккерель считает, что «люди, на попечении которых все это окажется, будут не высококвалифицированными гидравликами в белых костюмах. Поэтому хотелось бы, чтобы система, как и старые паровые двигатели, была простой в эксплуатации. Все, что для них требуется, — это гаечный ключ; что же касается гидравлической системы, то и песчинка может вывести ее из строя. Решает практика.

¹³ Циолковский К. Э. Волнолом и извлечение энергии из морских волн. — Вестн. знаний, 1935, № 4, с. 298—300. Цит. по: Циолковский К. Э. Собр. соч. М.: Наука, 1964, т. 4, с. 362—364.

¹⁴ Росс Д. Энергия волн. Л.: Гидрометеиздат, 1981, с. 71.

Лучше пользоваться примитивнейшей техникой, если она надежнее»¹⁵.

В 1978 г. Коккерелю удалось сделать действующий макет «плота» из двух звеньев (установлен в Соленте) мощностью 1 кВт. Это был первый случай получения в Англии электрической мощности с помощью волн.

Преобразование энергии волн с помощью «петли» или «плота» основано на относительных перемещениях соседних частей корпуса: что-то вроде килевой качки судна с отломанной кормой. Длина плота должна быть близка к длине поверхностных волн. В этом случае он работает наиболее эффективно. Сообщается, что при волнах длиной 100 м с периодом около 8 с при высоте 10–12 м механический коэффициент полезного действия плота близок к 100 %. Цифра эта уменьшается с увеличением длины волн по отношению к длине плота. В пределе, при очень длинных волнах, когда все составные части плота располагаются на одной прямой, относительные перемещения звеньев плота отсутствуют и энергия не вырабатывается. В этом заключается одна из особенностей подобных преобразователей.

Но все суда кроме килевой качки обычно испытывают еще и бортовую. Бортовая качка может с успехом использоваться для преобразования энергии волн в электрическую энергию. Для этой цели необходимы преобразователи иного типа, нежели «петля» или «плот».

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В пневматических преобразователях энергия волн трансформируется в энергию воздушного потока, который используется для работы пневматического турбогенератора. Поскольку волновые скорости обычно малы, при подобном преобразовании одновременно принимаются меры к увеличению скорости воздушного потока. Для достижения этой цели соответственно уменьшается площадь поперечного сечения воздушного подводящего трубопровода.

Пневматический принцип преобразования энергии волн подкупает своим изяществом. Он хорош еще и тем, что освобождает от гидравлических ударов хрупкие детали турбогенераторов. В настоящее время известно несколько конструкций пневматических преобразователей, существ-

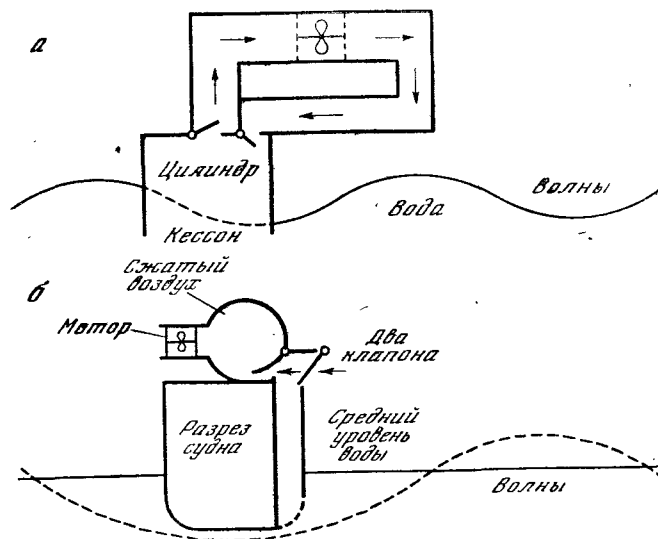


Рис. 12. Пневматический преобразователь энергии поверхностных волн и зыби К. Э. Циолковского

а — преобразователь с кессоном, б — судовая установка

венно отличающихся друг от друга. Ниже рассматриваются основные типы пневматических преобразователей отечественных и зарубежных авторов.

Идея пневматического преобразования энергии волн с целью получения полезной работы была высказана К. Э. Циолковским в 1935 г.¹⁶ Вот что он писал 50 лет назад: «... Действие мотора основано на том, что в сосуде с крышкой, но без дна, или в кессоне, погруженном в волны, давление на воздух в нем то увеличивается, то уменьшается, — конечно, при волнении.

На рис. 12 наглядно изображен такой прибор. Когда давление увеличивается, воздух в сосуде сжимается, поднимает левый клапан, закрывает правый и устремляется в подобие паровой машины или турбины (только работает не пар, а воздух). Когда же давление ослабевает,

¹⁶ Циолковский К. Э. Волнолом и извлечение энергии из морских волн. — Вестн. знаний, 1935, № 4, с. 298–300. Цит. по: Циолковский К. Э. Собр. соч. М.: Наука, 1964, т. 4, с. 363 (в работе Циолковский ссылается на волновой двигатель особого типа, предложенный инженером Виммером, но без указания места его публикации).

¹⁵ Там же, с. 72.

воздух в кессоне разрежается, левый клапан запирается, а правый открывается, и воздух из левой части прибора перегоняется в разреженное справа пространство. Тот же воздух машины циркулирует через воздушный мотор, извлекая работу из энергии волн. Процент использования этой энергии может быть невелик, но ведь волнение не только ничего не стоит, но даже вредно, и желательным является даже малое ослабление его.

Регулировка и равномерность действия мотора достигается наличием воздушных резервуаров, соединенных с правыми и левыми трубами.

Можно упростить снаряд — обойтись без разрежения, отбросив правую половину его. Оба клапана остаются, но правый выходит прямо в воздух. Действие такой машины будет слабее. Если она на берегу, то ослабит разрушение, производимое волнами. Как береговой прибор она удобна, так как воздушные трубы можно проводить далеко от воды. Если же приборы эти находятся на некотором расстоянии от берега, на моле или на особых судах-плотах, то они как искусственная гавань служат и для охраны от волнения. В таком случае сами суда должны иметь кессоны, в которых сжимается воздух».

Предложение К. Э. Циолковского не было реализовано в свое время. Однако некоторые современные пневматические преобразователи по своей схеме весьма похожи на описанную Циолковским. Один из ее недостатков заключается в применении двух клапанов, что вызывает потери энергии воздушной струи. Резкие повороты в направлении движения воздушного потока также способствуют потери энергии.

Более совершенной является конструкция пневматического преобразователя, предложенного в 70-х годах советским изобретателем И. А. Бабинцевым. Пневматический преобразователь Бабинцева не имеет клапанов. Для обеспечения постоянства направления вращения ротора турбины при переменном направлении воздушного потока используются два направляющих аппарата, выполненные зеркально-симметричными относительно плоскости вращения рабочего колеса турбины.

Общий вид пневматического преобразователя конструкции И. А. Бабинцева представлен на рис. 13. Преобразователь представляет собой буй, разделенный внутри на три части. Воздушная камера по оси буя — труба, открытая снизу. Под действием проходящих волн в ней колеблется водяной столб, вызывающий соответствующие колебания

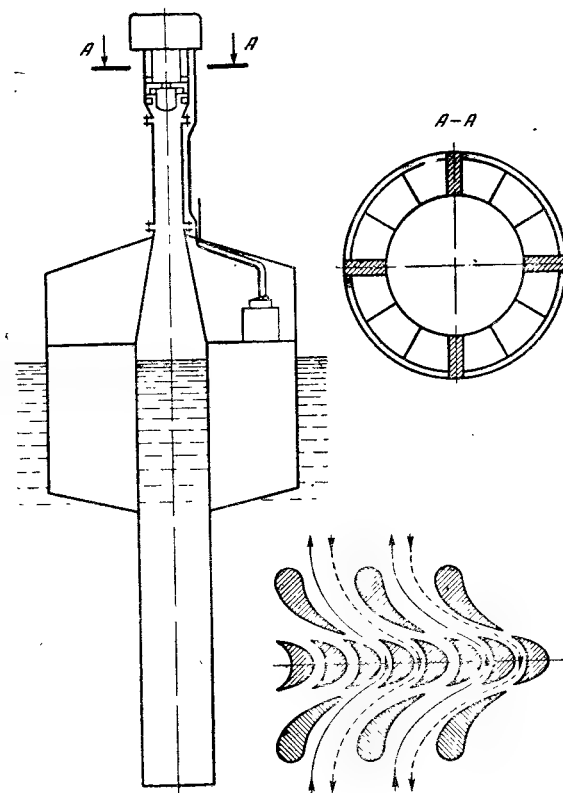


Рис. 13. Пневматический преобразователь И. А. Бабинцева и схема прохождения воздуха через турбину

давления воздуха в ее верхней части. К фланцу воздушной камеры прикреплена воздухоподводящая труба, на верхнем фланце которой укреплен кожух пневматической турбины. В верхней части кожуха размещен синхронный электрический генератор, ось которого соединена с осью турбины. Между генератором и цилиндрической стенкой общего (турбины и генератора) корпуса имеется кольцевой канал, позволяющий воздуху из камеры выходить в атмосферу при подъеме воды или, наоборот, засасываться из атмосферы во время понижения уровня. В верхней части корпуса смонтированы выпрямитель и стабилизатор напряжения, связанные кабелем с аккумулятором, установленным в верхнем герметичном отсеке буя. Другой кабель служит для питания огней буя.

Наибольший интерес представляет схема движения воздушного потока через рабочее колесо турбины. Направляющие аппараты имеют зеркальную симметрию относительно плоскости вращения рабочего колеса турбины, которое помещено между ними (сплошные стрелки на рисунке указывают движение воздушного потока через турбину в прямом направлении, а пунктирные — в обратном).

Изобретатель так описывает работу своего преобразователя: «При движении волн по водной поверхности буя совершает периодические колебания с вертикальными перемещениями всего корпуса. При этом воздух в воздушной камере буя также периодически сжимается или разрежается. В соответствии с изменениями давления воздух из воздушной камеры буя или вытесняется в атмосферу, или всасывается из атмосферы в воздушную камеру буя через турбину и направляющие аппараты. Независимо от направления движения воздушного потока он оказывает динамическое давление на лопатки турбины в одном направлении, что и обеспечивает неизменное направление вращения рабочего колеса турбины». В этом состоит важная особенность конструкции преобразователя И. А. Бабинцева.

При изменениях направления воздушного потока через турбину его скорость проходит через нуль. В это время вращение пневматического турбогенератора поддерживается за счет кинетической энергии, запасенной в маховике, сидящем на общем валу с турбогенератором. Надлежащим выбором суммарного момента инерции вращающихся частей колебания скорости вращения можно свести к необходимому минимуму. Этой же цели служит блок стабилизатора напряжения и аккумулятор. Но главное назначение последнего — обеспечение энергетических потребностей буя в штилевую погоду, когда нет волн и турбогенератор не работает.

Волновые энергетические установки системы И. А. Бабинцева выпускаются двух типов — ВЭМУ-6 и ВЭМУ-12 одинаковых габаритов: турбогенератор 280×280×210 мм, блок выпрямления и стабилизации 360×206×150 мм, контейнер с аккумуляторами 345×255×1012 мм. Время работы установок без обслуживания 180 суток. Их техническая характеристика приведена ниже:

Показатели	ВЭМУ-6	ВЭМУ-12
Номинальное выпрямленное напряжение, В	6,3	12,6
Колебания напряжения, В	±0,63	±1,26

Выходная мощность, Вт	20	25
Рабочий диапазон оборотов вала турбогенератора, тыс. об./мин	1÷3	2÷3
Емкость аккумуляторной батареи, Ач	125	250
Высота волны, при которой начинается зарядка аккумулятора, м	0,2	0,3
Общая масса установки, кг	105	360
в том числе		
турбогенератора	10	10
блока выпрямления и стабилизации	5	5
контейнеров с аккумуляторами	75	3000

Обе модификации рассчитаны на работу при следующих погодных условиях: скорость ветра — до 50 м/с, наклон буя от вертикали — до $\pm 10^\circ$, допустимые колебания температуры окружающей среды — в пределах от -30 до $+40^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха — до $95 \pm 3\%$.

Преобразователи описанного типа предназначены для питания навигационных огней и аппаратуры радиомаяков. Они также могут быть применены для энергоснабжения гидрометеорологических постов, радиорелейных линий связи, для катодной защиты от коррозии трубопроводов и подводных стальных сооружений. При некотором увеличении мощности подобные установки найдут и много других полезных применений, начиная от опреснения воды и кончая питанием устройств бытового назначения.

В настоящее время в мире насчитывается около 700 навигационных буев, энергетические потребности которых обеспечиваются маломощными пневматическими преобразователями. Пневматические преобразователи энергии морских волн первыми начали работать на морских просторах в интересах обеспечения безопасности мореплавания. Мощность энергетической установки каждого навигационного буя обычно не превосходит 25—30 Вт. Несколько сот подобных буев, известных под общим названием «WATG» («система для наблюдений в море»), построено в Японии. Изготавливаются два типа подобных установок: один — для применения на плавучих навигационных буйках, второй — стационарный, для маяков. Принцип действия и механизмы для обоих типов одинаковы, разница лишь в незначительных конструктивных особенностях, вызванных способом использования.

Общий вид плавучего навигационного буя японской системы представлен на рис. 14 в двух положениях — на гребне волны и в ее ложбине. Хорошо видна центральная труба, соответствующая воздушной камере в кон-

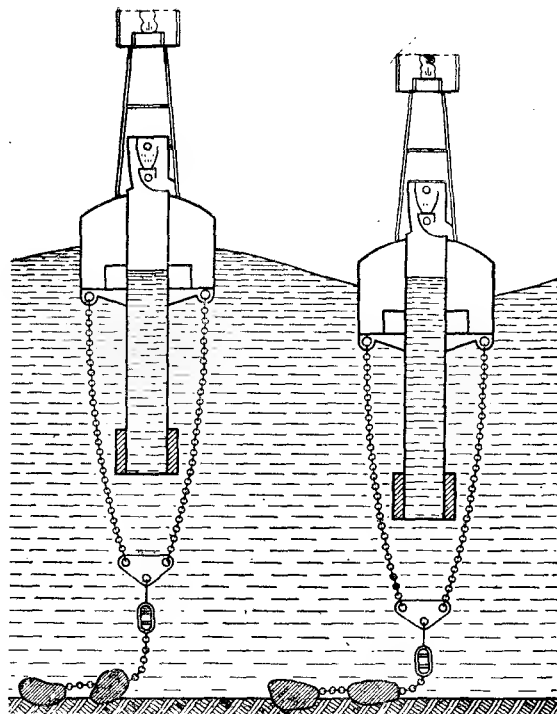


Рис. 14. Навигационный буй с питанием сигнального огня за счет энергии поверхностных волн

струкции И. А. Бабинцева. Однако на этом сходство практически кончается. Имеется особая камера с клапанами, а внутри нее — пневматический турбогенератор. Нижний конец центральной трубы открыт в воду, а верхний — в камеру пневматического турбогенератора. Когда буй качается вверх-вниз, колебания уровня воды в трубе создают тягу воздуха, например, когда гребень волны подходит к бую, то он поднимается вверх благодаря плавучести. В этот момент, пока уровень воды в трубе еще не изменился, там образуется разрежение, из-за чего атмосферный воздух будет входить в трубу через клапаны камеры. Когда к бую подходит впадина волны, он опускается под влиянием собственного веса. В этот полупериод воздух из центральной трубы будет вытесняться водой и выходить через выходные клапаны камеры турбогенератора.

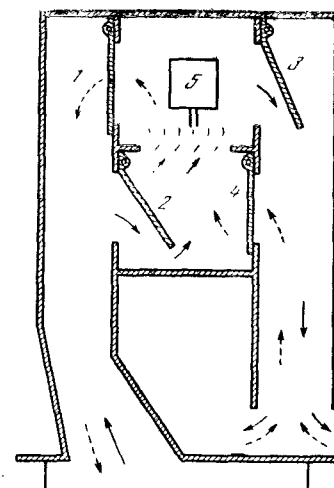
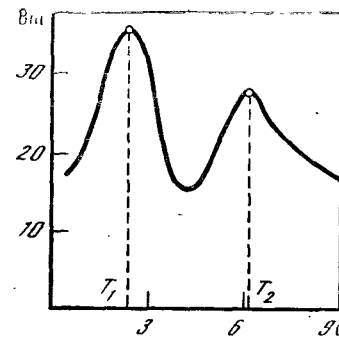


Рис. 15. Клапанная камера навигационного буя
1—4 — клапаны, 5 — воздушный турбогенератор

На рис. 15 приведена схема устройства камеры с клапанами, внутри которой размещен турбогенератор. Камера имеет четыре клапана, необходимых для создания однонаправленного воздушного потока во время прохождения обоих полупериодов поверхностных волн. Столь большое количество клапанов не может быть отнесено к числу достоинств рассматриваемой системы. Указывается, что можно обойтись всего одним клапаном, если ограничиться работой турбины только на выходящем воздушном потоке. Однако использование этого предложения означает уменьшение средней мощности установки минимум вдвое, что вряд ли желательно. В свете сказанного, а также учитывая сложность клапанной коробки, особенно хорошо видны преимущества системы И. А. Бабинцева. Однако для его конструкции нужна турбина с особым направляющим аппаратом, а японские специалисты воспользовались самолетной пусковой турбиной с ротором диаметром 20 см, заменив для облегчения конструкции ее стандартный ротор из жароупорного сплава алюминиевым. Пневматические клапаны сделаны из стеклопластика толщиной 2 мм, герметизирующие прокладки — из неопреновой резины. Используется трехфазный генератор переменного тока с кремниевым выпрямителем.

Рис. 16. Зависимость мощности, отдаваемой электрическим генератором навигационного буя, от периода поверхностных волн



Для любой системы преобразования с плавающим буюм и центральной трубой, т. е. независимо в первом приближении от особенностей устройства силового пневмоагрегата, важно соблюдение некоторых оптимальных соотношений между периодом собственных колебаний столба воды в его центральной трубе и собственными колебаниями буюа. Если бы буй и водяной столб колебались с одним периодом и в одной фазе, то никакой мощности снять с воздушного столба было бы нельзя. Воздушная труба, составляющая одно целое с корпусом буюа, играет роль цилиндра, поршнем которого является водяной столб. Чтобы такой «насос» работал, необходимо их относительное перемещение.

Как показывает рис. 16, резонансная кривая преобразователя имеет два максимума, причем первый больший максимум отдаваемой мощности соответствует периоду T_1 собственных колебаний буюа в целом.

Период собственных вертикальных колебаний буюа с центральной трубой японскими авторами определяется формулой

$$T_1 = \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{9g\rho S}} \text{ с,}$$

где m_1 — масса буюа, кг; m_2 — средняя масса морской воды в трубе, кг; ρ — плотность морской воды, кг/м³; S — площадь буюа, м².

Второй максимум соответствует периоду T_2 собственных колебаний столба воды в центральной трубе; он значительно меньше. Период собственных колебаний столба воды в центральной трубе буюа является функцией длины трубы и может быть аппроксимирован приближенной формулой

$$T_2 = 2\pi \sqrt{l_r/g},$$

где l_r — длина трубы, м; T_2 — период собственных колебаний столба воды в U-образной трубе удвоенной длины, где диаметр второго плеча бесконечно велик.

Заметим, что полезная мощность, которая может быть снята пневматической турбиной, зависит не только от точности настройки колебаний водяного столба или буюа в резонанс с частотой колебаний поверхностных волн. Пневматический преобразователь энергии поверхностных волн следует рассматривать как сложную систему, состоящую минимум из двух связанных колебательных контуров,

собственные периоды колебаний которых приближенно определяются формулами, приведенными выше.

Из теории колебаний известно, что для получения максимальной мощности от одного из связанных контуров коэффициент связи между ними должен удовлетворять определенному соотношению. Практически это означает, что в преобразователе должно иметься устройство для регулирования коэффициента связи между буюом и центральной трубой или воздушной камерой. Ни в одной из рассмотренных выше систем подобного регулятора нет, что свидетельствует о наличии потенциальной возможности их усовершенствования.

В этих преобразователях имеется, очевидно, еще и третья колебательная система. Речь идет о воздушном столбе. Он приводится в движение колеблющимся водяным столбом, который действует на него как поршень. Под действием этого поршня воздушный столб совершает вынужденные колебания, производя необходимую работу. Однако собственная частота колебаний воздушного столба, как правило, не может совпадать с частотой вынуждающих колебаний. Собственную частоту колебаний воздушного столба, по-видимому, не учитывал ни один автор. К счастью, она достаточно высока и острой надобности в ее учете не возникало в конструкциях относительно маломощных пневматических преобразователей. Однако с увеличением мощности и соответственно размеров воздушных камер их резонанс будет перемещаться в низкочастотную область.

Весьма оригинально подошли к решению задачи преобразования энергии волн английские конструкторы Уиттекер и Уэллс. Они предложили конструкцию пневматического преобразователя энергии волн без клапанов (рис. 17). В верхней части преобразователя находится пневматический турбогенератор мощностью 45 кВт. Главной особенностью пневматической турбины является ротор, обладающий выпрямляющим действием. Оно заключается в том, что ротор сохраняет неизменным направление своего вращения при перемене направления воздушного потока, следовательно, поддерживается неизменным и направление вращения генератора. Ротор турбины диаметром 1,36 м имеет лопасти симметричного профиля, установленные без угла атаки. Поэтому перед началом работы ротор необходимо раскрутить.

Воздушный поток создается с помощью камеры, имеющей вид полусферы, открытой в нижней части, куда входят волны. В верхней части камера заканчивается па-

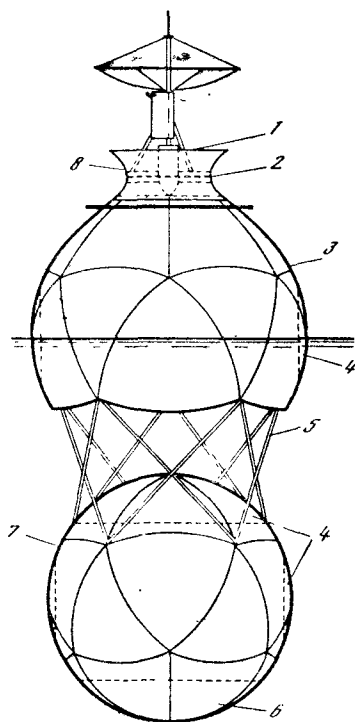


Рис. 17. Пневматический преобразователь энергии поверхностных волн Унттекера и Уэллса

1 — генератор мощностью 45 кВт, 2 — пневматическая турбина с ротором диаметром 1,36 м, 3 — купол диаметром 4,5 м, 4 — элемент плавучести, 5 — стальная трубчатая арматура, 6 — балласт, 7 — стальной поплавок нейтральной плавучести диаметром 4 м, 8 — насадка Вентури

садкой Вентури, внутри которой расположен ротор турбины. Диаметр полусферы 4,5 м.

Вся конструкция преобразователя укреплена на бую нейтральной плавучести в виде стальной сферы диаметром 4 м. В сферу было залито 30 т воды, что позволило уравновесить конструкцию в нужном положении на поверхности моря. Буй нейтральной плавучести играет роль инертной массы, как показали теоретические

расчеты авторов, — это наиболее выгодное применение инерционной массы с минимальной плавучестью.

Однако буй нейтральной плавучести оказался самым неудачным звеном этой интересной конструкции. Преобразователь потерпел аварию при первом же зимнем шторме 1978 г. Преобразователь был снабжен пятиканальной телеметрической системой, которая, в частности, позволяла контролировать работу ротора. Однако авария произошла быстрее, чем с преобразователя поступила какая-либо информация о его работе.

Было бы интересно испытать этот преобразователь с более надежной инертной массой, типа стабильного буя И. Кусто, который потерпел аварию лишь после нескольких лет безупречной работы (в Японском заливе), когда высота волн во время необычно сильного шторма превысила высоту расположения входного люка (8 м). Небольшой буй подобного типа, в конструкции которого нет ненадежных дверей, в течение многих лет успешно противостоит штормам на Черном море. Водоизмещение

его — около 60 т. Буй практически не качается: его колебания по вертикали не превышают $\pm 0,15$ м во время сильного шторма. При применении подобного буя достигается та же цель, какую стремились достигнуть Унттекер и Уэллс, и одновременно обеспечивается необходимая надежность всей установки, что подтверждается практикой.

Большую известность получила мощная установка с пневматическими преобразователями, известная под названием «Каймей» (или система профессора Йошио Масуды). В ее создании принимали участие США, Канада и Великобритания. В результате реализации этого проекта была построена самая мощная волноэнергетическая установка с пневматическими преобразователями. Первая электроэнергия была получена осенью 1978 г.

Установка «Каймей» состоит из 11 одинаковых пневматических турбогенераторов по 125 кВт каждый. Суммарная проектная мощность установки — 1,375 МВт. Установка выполнена на барже длиной около 80 м, шириной 12 м. Каждый агрегат состоит из двух камер, улавливающих энергию волны, турбины и электрического генератора, сидящего на одном валу с турбиной (диаметром 1,4 м при 60 лопатках). В днище баржи имеется 22 отверстия для прохода волн в воздушные камеры (результаты морских испытаний показали, что расположение входных отверстий для волн в днище баржи нельзя признать удачным). Баржа была поставлена на якоря у побережья Японии на глубине 40 м, на расстоянии 2,5 км от берега.

Принцип действия двухкамерного преобразователя поясняется с помощью рис. 18. При прохождении гребней поверхностных волн уровень воды в воздушных камерах I и II поднимается, благодаря чему в них происходит сжатие воздуха. Поэтому клапан 1 закрывается, а клапан 2 открывается. Направление движения воздушного потока показано стрелками. Видно, что из камеры I воздушный поток проходит через турбину и отдает ей свою энергию, полученную от гребня волны. Совершив работу в турбине, воздух выходит в атмосферу через клапан 2. Максимальная скорость воздушного потока при подходе к турбине достигает 100 м/с или несколько выше, как показывают осциллограммы. При прохождении ложбины волны, т. е. при понижении уровня воды, в камерах I и II возникает разрежение воздуха. Поэтому воздух из атмосферы поступает в камеры через клапан 1. Клапан 2 в этот полупериод закрыт.

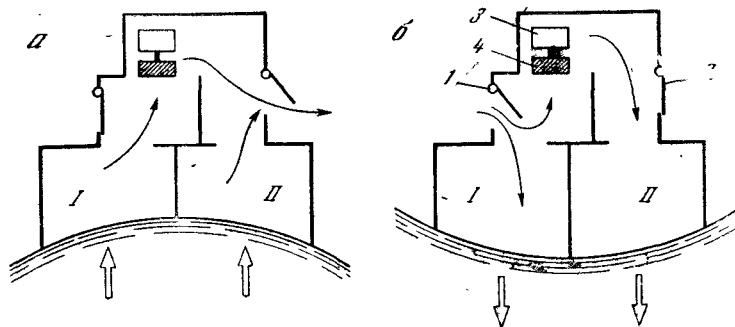


Рис. 18. Двухкамерный пневматический преобразователь И. Масуды

а — направление воздушного потока при прохождении гребней волн, б — то же при прохождении ложбин волн

Воздух, всасываемый в камеру 2, совершает работу в турбине 4, вращающей генератор 3.

Движение воздуха будет происходить, как описано только в том случае, если суммарная длина обеих камер по направлению движения волн будет существенно меньше половины их длины. В противном случае направления движения воды в камерах будут иметь противоположные знаки и полезный эффект будет меньше. Кроме того, баржа-носитель не должна всплывать при подходе гребня или заметно опускаться при прохождении ложбины. Это условие близко к требованию отсутствия килевой качки для судна-носителя. Требование это трудно выполнить, особенно для относительно короткого корпуса баржи. В зависимости от особенностей собственных колебаний корпуса носителя силовые агрегаты, находящиеся на его разных концах, будут находиться в разных фазовых отношениях к приходящим волнам.

Согласно более поздним сообщениям (1981 г.), с каждого силового агрегата установки «Каймей» вместо ожидаемых 125 кВт удалось снять только 20 кВт, т. е. в 6 с лишним раз меньше. Вместо 1375 кВт суммарной мощности было получено лишь около 200 кВт. Столь значительное расхождение с проектными цифрами объясняется неудачным расположением входных отверстий для волн в днище баржи. Поверхностные волны, ныряя под ее корпус, неизбежно уменьшают свою амплитуду. Корпус баржи действует как волнолом и, видимо, существенно уменьшает энергию, вводимую в воздушные камеры. Для устра-

нения этого недостатка баржа-носитель была поставлена в док для переделки, чтобы входные отверстия для волн сделать по бортам баржи. Можно полагать, что это улучшит условия работы пневматических преобразователей, однако остаются и другие причины, влияние которых должно быть исследовано.

Конструкция преобразователя И. Масуды была усовершенствована в Великобритании в Ист-Килбрайдской национальной инженерной лаборатории. При этом особое внимание было обращено на место входа волн в воздушную камеру — разработана гидродинамически обоснованная конструкция входа. Английский вариант установки получил известность как «преобразователь с осциллирующим водяным столбом».

В Великобритании придают важное значение выбору судна-носителя для пневматического преобразования энергии волн. Если колебания баржи-носителя будут совпадать по фазе с фазой поверхностных волн, то они не будут совершать значительной работы в воздушных камерах преобразователя. Лучше, если носитель будет неподвижен. Однако выполнить это условие в открытом море затруднительно. Р. А. Меир (из Ист-Килбрайдской национальной инженерной лаборатории) предложил конструкцию особого понтона, имеющего форму «опрокинутого дилижанса». Дилижансы, как известно, обтекаемостью форм не отличались, но изобретатель считает, что конструкция будет служить в качестве носителя столь же эффективно, как и неподвижная конструкция, укрепленная на морском дне. Правда, при условии, что волны, генерируемые корпусом самого «дилижанса», будут малы. Насколько удачным окажется подобное решение вопроса, покажет будущее.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Гидравлическими называют такие преобразователи, в которых роль рабочей жидкости выполняет сама вода (морская или пресная — безразлично), причем рабочей — в самом широком смысле. Это означает, что вода не только совершает работу в той или иной турбине, как это иногда делается и в других типах преобразователей (например, в гидравлической системе плота Коккереля), но столб воды служит непосредственно для съема энергии с поверхностных волн.

Одна из главных трудностей при преобразовании энергии поверхностных волн в электроэнергию вызвана их

недостаточной в среднем высотой и связанной с ней малой средней скоростью орбитального движения частиц воды. Средняя высота поверхностных волн в Мировом океане оценивается в 2,5 м. Для среднего периода волн $T=8$ с среднее значение орбитальной скорости воды в таких волнах

$$V_{\text{ср}} = A \omega = 1,25 \frac{6,28}{8} = 0,97 \text{ м/с,}$$

где $A=1,25$ м — средняя амплитуда волн для Мирового океана; $\omega=2\pi/T=2 \cdot 3,14/8=0,78$ — средняя угловая частота волн.

Водные потоки со скоростями менее 1 м/с гидроэнергетики считают не представляющими практической ценности. Отсюда следует важнейшее требование к гидравлическим преобразователям: они должны увеличивать напор или скорость водного потока, формирующегося в результате работы преобразователя.

Поверхностные гравитационные волны обладают еще одним важным физическим свойством. На поверхности глубокой воды частицы движутся по траекториям, близким к окружностям. Как мы только что подсчитали, скорость орбитального движения близка к 1 м/с для волн высотой 2,5 м. Но при подходе к мелководью форма волновых орбит изменяется. Происходит трансформация волн, приводящая к усилению составляющей скорости, направленной по береговому склону. Образуется прибой, волны которого ударяясь о каменистый берег, поднимают высоко вверх часть воды. Это явление используется в волновой энергетике с помощью гидравлического тарана, обладающего свойством увеличивать напор.

Гидравлический таран преобразует часть кинетической энергии большой массы воды в кинетическую энергию малой массы, за счет чего вода приобретает большую скорость и способна подняться на значительную высоту. Гидравлический таран — изобретение французского физика Монгольфье (одного из двух братьев, создавших в 1783 г. воздушный шар). Патент на водоподъемную машину «Гидравлический таран» Монгольфье получил в 1797 г. Первый таран был сделан и смонтирован самим изобретателем (вблизи Парижа) и работал около 60 лет без ремонта. Гидравлические тараны (известные также под названием инерционных насосов) были широко распространены в Европе. Применялись раньше они и у нас в стране, однако с развитием артезианских скважин и

централизованного водоснабжения постепенно вышли из употребления. Факты свидетельствуют о надежности конструкции тарана. Это вселяет надежду на то, что волноэнергетические установки, основанные на принципе гидравлического тарана, также окажутся надежными в эксплуатации. Правда, условия их эксплуатации в море будут значительно тяжелее наземных.

Академик В. В. Шулейкин один из первых оценил достоинства тарана в качестве преобразователя энергии поверхностных волн¹⁷. Еще перед Великой Отечественной войной в Черноморском отделении Морского гидрофизического института АН СССР (в поселке Кацивели) была построена на скалистом берегу энергетическая установка с гидравлическим тараном и турбогенератором, развивавшая мощность до 10 кВт¹⁸.

Установка в Кацивели относилась к типу береговых таранных установок. Для успешной работы подобной установки необходим береговой склон, профиль которого был бы благоприятен для возникновения максимального эффекта гидравлического тарана. Речь идет о профиле берегового канала, входя в который, набегающие волны наилучшим образом трансформировали бы свою энергию для подъема части воды в напорный бассейн, расположенный на высоте, значительно превышающей высоту волн. В Кацивели велись работы по выбору оптимального профиля сечения канала для достижения максимальной фокусировки волн. Вопрос этот достаточно сложен и в то время он окончательно решен не был.

В настоящее время в теории и практике строительства энергетических таранных установок достигнуты значительные успехи. Одним из примеров может служить программа обеспечения энергией острова Маврикий в Индийском океане, практически не имеющего традиционных источников энергии. Программа основана на применении гидравлического тарана, располагаемого в лагуне острова. Таран использует энергию волн для накачивания воды в напорный резервуар на берегу. Из резервуара вода подается к турбинам, вращающим генераторы электрической энергии мощностью 18 МВт. В Норвегии разработана волновая энергетическая уста-

¹⁷ См.: Шулейкин В. В. Физика моря. М.; Л.: ОНТИ, 1938, т. 2, с. 314—315, 320.

¹⁸ К сожалению, не сохранилось ни самой установки, ни ее описания, ни чертежей: все погибло в 1941 г.

новка, интересная наличием системы фокусировки волн. Фокусирующая система вынесена в море и заканчивается воронкообразным каналом, увеличивающим напор воды настолько, что заполняется напорный бак на высоте 100 м. Из бака вода спускается в турбину. В печати было сообщение о проведении испытаний у побережья Калифорнии волновой электростанции мощностью 2 тыс. кВт. построенной на искусственном атолле.

Перечисленные установки — силовые прибрежные волноэнергетические устройства, использующие твердое основание для размещения необходимых частей и механизмов. Иначе дело обстоит в открытом море, где твердое основание, необходимое для постройки фундамента тарана, находится на практически недоступной глубине. Для работы в открытом море предложены плавучие установки с гидравлическими преобразователями.

«Первой ласточкой» в ряду гидравлических преобразователей таранного типа для открытого моря явилась гидрогенераторная установка советского изобретателя А. Г. Баранова (30-е годы XX в.). В установке Баранова имеются многие элементы современных гидравлических преобразователей, предложенных позже советскими и зарубежными авторами; теперь их обычно называют волновыми, или инерционными, насосами. Одно из важных преимуществ гидравлических преобразователей состоит в том, что с их помощью энергия поверхностных волн не только относительно просто преобразуется в электрическую, но одновременно они могут служить и для решения других задач, например, использоваться на морских фермах, число которых будет возрастать по мере перехода от рыболовства к рыбоводству. Фермы нуждаются в электрической энергии для различных надобностей, одновременно им необходимо удобрение и подкормка для культивируемых там водорослей и морских животных. Ее с успехом может обеспечить вода из глубинных слоев морей и океанов, а также водохранилищ, поскольку содержание многих биогенных солей значительно увеличивается с глубиной.

Но подъем глубинной воды наверх (в фотическую¹⁹ зону) обычно требует затраты энергии. Правда, в Мировом океане имеются места, где процесс подъема глубинных вод

происходит сам собою, за счет естественных сил. Такие места называются апвеллингами. Подъем глубинной воды в апвеллингах на поверхность обеспечивает там интенсивный рост фитопланктона и соответственно богатые уловы рыбы.

Например, Перуанский апвеллинг, занимающий около 3 % площади Мирового океана, давал 20 % мирового улова рыбы. Но апвеллингов в Мировом океане мало. К тому же некоторые из них теперь включены в запретные зоны государств, вблизи которых они наблюдаются. Поэтому давно идет разговор о создании искусственного апвеллинга, и гидравлические преобразователи — новый путь для решения этой задачи. При достаточно длинной всасывающей трубе на поверхность может быть поднято необходимое количество глубинной воды без затраты какой-либо энергии, кроме энергии волн.

Гидравлические преобразователи могут также применяться для аэрации воды в застойных водоемах (подобная надобность нередко возникает, например, в лиманах, когда недостаток кислорода вызывает массовую гибель рыб или других животных) — это весьма перспективное направление их использования.

Некоторые виды культурных наземных растений допускают поливку соленой водой, поэтому возможно использование энергии поверхностных волн для накачивания морской воды с целью полива наземных плантаций в прибрежной полосе засушливых районов. Волновые инерционные насосы способны обеспечить подачу практически любых количеств морской воды. Были бы волны. Нерешенным остается вопрос о наилучшем способе подачи морской воды на берег. Морской водопровод — дело будущего. Имеющиеся трудности связаны с тем, что эффективное преобразование энергии волн в гидравлических преобразователях может происходить лишь при достаточно длинной трубе — порядка нескольких десятков метров. Это условие легко выполнить только в приглубой береговой полосе. Вблизи отмелого берега нельзя применить достаточно длинную вертикальную трубу, однако можно воспользоваться трубой, свитой в змеевик или наклонной.

Отметим еще одно возможное применение гидравлических преобразователей: извлечение из морской воды некоторых редких и ценных элементов. Об этом позволяет говорить большое количество воды, прокачиваемой при работе гидравлических преобразователей. Для попутной добычи необходимых элементов можно воспользоваться

¹⁹ Фотическая зона — поверхностный слой морей и океанов, где идет процесс фотосинтеза благодаря наличию достаточной освещенности за счет лучей Солнца.

Методом избирательной сорбции. Трудность при практическом решении этого вопроса представляет выбор подходящего адсорбента, способного устойчиво работать в условиях воздействия достаточно сильной струи воды, вырывающейся из выходного отверстия инерционного насоса. Важно также, чтобы гидравлическое сопротивление адсорбента было не слишком большим.

К числу преимуществ гидравлических преобразователей рассматриваемого типа относится также и то, что они имеют широкий динамический диапазон по частоте и амплитуде волн. Преобразователи способны работать от небольших волн — высотой порядка нескольких десятков сантиметров. Вместе с тем их конструкция достаточно проста и имеет только одну движущуюся деталь (клапан), что обеспечивает возможность работать при больших штормовых волнах.

Гидравлические преобразователи могут успешно применяться как для обеспечения энергией удаленных океанских буев, так и в качестве источника энергии для прибрежных районов и островов. В случае, когда требуется количество энергии, большее, чем может дать одна труба, можно соединить несколько труб с отдельными буями для работы на одну мощную турбину, устанавливаемую в центральной части расположения группы. Однако подобные многосекционные установки будут больше подвержены различным повреждениям во время штормов. В этом смысле преимущество всегда будет за компактными установками из одной или нескольких труб, связанных вместе. Выбор оптимальной формы использования подобных преобразователей — дело будущего. Важно отметить, что и с одной трубой можно получить достаточно большую мощность²⁰.

В создании гидравлических преобразователей инерционного типа известных успехов достиг американский ученый Д. Айзекс с коллегами. Принцип действия преобразователя их конструкции также основан на использовании инерционных сил, возникающих в водяном столбе, находящемся в подъемной трубе, при ее колеба-

ниях за счет энергии волн. Этот преобразователь в некоторой степени схож с гидравлическим тараном, но имеет более простое устройство: всего один клапан, работающий как выпрямитель потока, пропускающий его только в одном направлении. Наличие клапана с односторонней проводимостью потока исключает возникновение резонанса в водяном столбе подъемной трубы. Это обстоятельство обеспечивает возможность работы подобного преобразователя в широком диапазоне частот поверхностных волн. Известно, что частотный спектр поверхностных волн изменяется по мере их развития. Кроме того, в различных частях Мирового океана спектральный максимум энергии приходится на волны разных частот. Поэтому отсутствие надобности в подстройке гидравлического преобразователя под изменившуюся по той или иной причине частоту поверхностных волн очень важно практически.

ГИДРОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

А. Г. БАРАНОВА

В декабре 1936 г. А. Г. Баранов подал заявку на изобретение «Плавучая гидрогенераторная установка», зарегистрированную за № 2639. Описание изобретения было опубликовано 31 мая 1939 г. (авторское свидетельство по классу 886,8 за № 54999). Приведем описание изобретения А. Г. Баранова, следуя авторской заявке.

«В предлагаемой плавучей гидрогенераторной установке для использования энергии волн водоподводящая часть выполнена в виде инерционного насоса с отбойным и нагнетательными клапанами и с воздушным колпаком для выравнивания колебания давления между отдельными волнами, чем достигается возможность работы турбины с полезным напором, *превышающим высоту волн*.

На чертеже [рис. 19] фиг. 1 изображает поперечный разрез установки, фиг. 2 — электрическую схему установки и схему ее управления, фиг. 3 — поперечный разрез другой формы выполнения установки.

Плавучая гидрогенераторная установка представляет собой судно-поплавок 1, удерживаемое на месте якорными цепями 2 и снабженное длинной вертикальной открытой снизу трубой 3. Соответствующее погружение судна-поплавка достигается балластной водой, накачиваемой в помещение 4 с помощью вспомогательного насоса 5. Водоподводящая часть установки — труба 3 выполнена в виде инерционного насоса.

²⁰ Интересным новшеством в области малой энергетики является объединение в одном агрегате турбины и генератора электрической энергии: обмотки ротора располагаются в рабочем колесе турбины. Машины такого типа (известные под названием СТРАФЛО) представляют очевидный интерес для использования энергии поверхностных волн в гидравлических преобразователях.

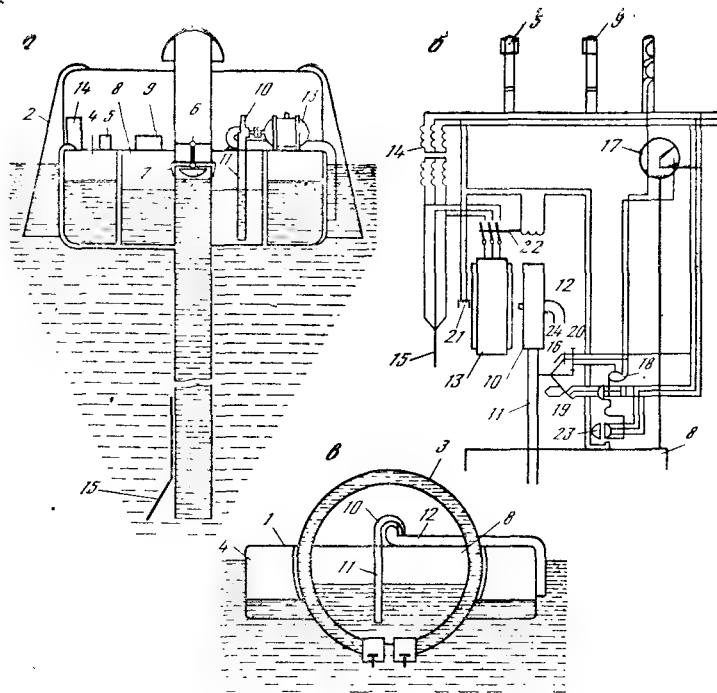


Рис. 19. Гидрогенераторная установка А. Г. Баранова

слева — поперечный разрез, справа — электрическая схема, внизу — вариант преобразователя со спиральной трубой

Отбойный клапан 6 сообщает трубу 3 с атмосферой, а нагнетательные клапаны 7 — с резервуаром воздушного колпака 8, где вода находится под давлением. Первоначальное давление создается небольшим вспомогательным компрессором 9. Из резервуара воздушного колпака 8 вода поступает в турбину 10 через трубу 11, а затем через эту трубу возвращается в море. Высоковольтный асинхронный генератор 13, соединенный муфтой с турбиной 10, превращает механическую энергию последней в электрическую. Трансформатор обеспечивает токком вспомогательные механизмы и освещение судна. Кабель 15 соединяет всю установку с сушей, т. е. с сетью ближайшей электрической станции.

Длинная вертикальная труба 3 придает судно-плавку вертикальную устойчивость, так что оно не качается на волнах, а лишь поднимается и опускается.

При подъеме судна клапан 6 открыт благодаря своей тяжести, и воздух беспрепятственно поступает в трубу 3, в которой уровень воды остается неизменным, так как морское волнение не распространяется на нижний конец трубы.

При опускании судна вода вытесняет воздух из трубы 3 в атмосферу, и отбойный клапан 6, будучи легче воды, закрывается и вследствие гидравлического удара часть воды из трубы 3 поступает через магистральные клапаны 7 в резервуар 8, где она находится под давлением. При каждом подъеме-опускании судна цикл повторяется, и в резервуар воздушного колпака 8 поступает новая порция воды.

Из резервуара воздушного колпака 8 вода идет в турбину 10, которой отдает свою энергию, и асинхронный генератор 13 преобразует последнюю в электрический трехфазный ток, поступающий через кабель 15 в сеть ближайшей станции.

При закрытой задвижке 16 (фиг. 2) и наличии волнения на море уровень воды в резервуаре воздушного колпака 8 будет повышаться, а давление в нем будет возрастать.

По достижении известного давления контактный манометр 17 включает контактор 18 и сервомотор 19 открывает задвижку 16. По окончании открытия задвижки ограничительный контакт 20 включает контактор 18, а следовательно, и сервомотор 19. Турбина 10 начинает вращать асинхронный генератор 13. По достижении числа оборотов, близкого к нормальному, центробежный выключатель 21 через контактор 22 соединяет асинхронный генератор 13 с кабелем 15, т. е. с сетью станции. В случае понижения уровня воды и соответствующего давления в резервуаре воздушного колпака 8 ниже допустимого контактный манометр 17 включает контактор 23, что приводит к разъединению асинхронного генератора 13 от сети и к закрытию задвижки 16 сервомотором 19. По закрытии задвижки сервомотор останавливается благодаря ограничителному контакту 24.

Из вышесказанного вытекает возможность иметь весьма упрощенные конструкции как асинхронного генератора 13, так и турбины 10. Асинхронный генератор имеет короткозамкнутый ротор; это вполне возможно, так как включение в сеть происходит лишь при числе оборотов, близком к нормальному. Простота конструкции турбины 10 заключается в том, что, во-первых, не требуется регулятора скорости, так как скорость регулируется асинхронным

генератором, и, во-вторых, можно применять неподвижное направляющее колесо (вместо обычного регулируемого). Как видно, чем больше волнение, тем больше энергии перекачивается в сеть станции. При малых волнениях перекачка энергии происходит с перерывами.

Автоматизм включения и выключения установки позволяет обойтись без постоянного обслуживающего персонала, ограничиваясь периодическим осмотром, что позволяет небольшому штату обслужить целую батарею подобных плавучих установок.

Для мест, недостаточная глубина которых не допускает применения длинной вертикальной трубы 3 инерционного насоса, предназначается форма выполнения установки, изображенная в поперечном разрезе на фиг. 3. Плавучей установке придается такая форма, что она качается на волнах, причем положение якорных цепей обеспечивает преобладание бортовой качки.

Благодаря этим качаниям в закрытых концах длинной трубы 3, обвивающей один или несколько раз центральную часть снаряда установки вокруг ее горизонтальной оси, возникают попеременно разрежения и повышенные давления, так что морская вода всасывается в трубу через клапаны и выдавливается через клапаны 7 в резервуар воздушного колпака 8, где она находится под давлением.

В остальном форма выполнения (турбина, генератор, схема управления, вспомогательные механизмы) ничем не отличается от ранее описанной.

Предмет изобретения

1. Плавучая гидрогенераторная установка для использования энергии волн, отличающаяся тем, что для возможности работы турбины 10 с полезным напором, превышающим высоту волны, водоподводящая часть 3 установки выполнена в виде инерционного насоса с отбойным 6 и нагнетательным клапанами 7 и воздушным колпаком 8 (фиг. 1).

2. Форма выполнения плавучей гидрогенераторной установки, отличающаяся тем, что для использования преимущественно бортовой качки плавучего снаряда установки труба 3 инерционного насоса двойного действия обвивает один или несколько раз центральную часть снаряда вокруг его горизонтальной оси (фиг. 3).

Авторское свидетельство А. Г. Баранова говорит о том, что волновой инерционный насос — русское изобретение, А. Г. Баранов четко сформулировал одну из

главных особенностей волнового инерционного насоса — возможность получения напора, превышающего высоту волн. Это очень важное свойство установки, поскольку поверхностные волны являются относительно низкопотенциальным источником энергии, из-за чего их не всегда легко использовать. Это важное свойство установка А. Г. Баранова унаследовала от гидравлического тарана. Таран — простая машина, и поэтому очень надежная. Но волно-энергетическая установка, оснащенная гидравлическим тараном, включает дополнительные детали, необходимые для выработки электрической энергии, т. е. гидравлическую турбину, трансмиссию, электрический генератор и некоторые другие устройства, необходимые для контроля и управления всей установкой.

В гидрогенераторной установке Баранова сохранены основные элементы инерционного насоса, т. е. гидравлического тарана, в том числе два клапана. С современной точки зрения два клапана для волноэнергетической установки не нужны. Вполне достаточно одного. Более того, наличие двух клапанов даже вредно, поскольку понижает КПД установки в условиях волнового режима работы, т. е. отбойный клапан 6 — лишний.

ВИБРАЦИОННЫЙ И ВОЛНОВОЙ НАСОСЫ

Среди полезных применений вибрации можно упомянуть вибрационный насос (рис. 20). В основу его устройства положена идея, представляющая некоторый интерес с точки зрения преобразования энергии поверхностных волн. Насос представляет собой трубу 1, в нижней части которой имеется клапан 2 с пружинами 3, прижимающими его к входному отверстию для воды, в нижнем фланце трубы. В верхней части трубы имеется выходное отверстие (окно) 4, через которое выливается поднимаемая вода. Перед началом работы труба заливается водой. Насос работает следующим образом.

«Если труба зафиксирована в показанном на рисунке положении или если она движется вверх, то клапан будет оставаться закрытым. Но если придать трубе достаточную скорость, направленную вниз, то нагрузка на клапан с внешней стороны сможет возрасти настолько, чтобы преодолеть сопротивление пружин и внутреннее давление столба воды. Тогда клапан откроется и через нижнее отверстие в трубу станет поступать вода из бассейна;

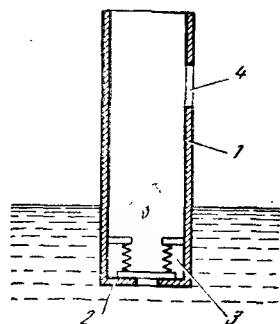


Рис. 20. Вибрационный насос

соответственно через верхнее окно вода будет выливаться наружу.

Идея водоподъемника состоит в том, чтобы этапы движения вверх и вниз чередовались; при этом желательно, чтобы размахи таких колебаний были достаточно малы (хотя бы потому, что бассейн может иметь малую глубину). Тогда в каждом цикле в трубу через нижнее сечение будут поступать определенные порции воды, а из окна будут с той же периодичностью выбрасываться такие же порции. Можно сказать, что в среднем установится течение воды вверх по трубе»²¹.

Для обеспечения колебаний трубы по вертикали можно воспользоваться либо вибровозбудителем дебалансного типа, либо возбудителем электромагнитного типа. Роль возбудителя колебаний трубы могут выполнить и поверхностные волны. Для этого трубу следует укрепить на поплавке, способном колебаться по вертикали с амплитудой, близкой к амплитуде поверхностных волн. В этом случае клапан на нижнем конце трубы не требуется. Хотя это и кажется парадоксальным, но труба будет качать воду без клапана: восходящий поток воды в ней будет возникать каждый раз во время прохождения ложбин поверхностных волн, когда поплавок с трубой опустится ниже среднего уровня спокойного моря. В этом случае из верхнего конца трубы будет выливаться вода на основе принципа сообщающихся сосудов (одним из которых является сама труба, а вторым — окружающая ее вода). Эффект будет наблюдаться только при достаточно длинной трубе, когда динамическое давление проходящих волн на ее нижнем конце будет близко к нулю. Такое условие легко выполняется при длине трубы, близкой к половине длины поверхностных волн. Подобное устройство является простейшим способом подъема глубинной воды в поверхностный слой водоема.

Рис. 21 поясняет принцип действия этого устройства. Здесь 1 — подъемная труба, 2 — поддерживающий ее поплавок. Стрелками показано направление течения воды во время прохождения ложбин поверхностных волн.

²¹ Бишоп Р. Колебания. М.: Наука, 1979, с. 155.

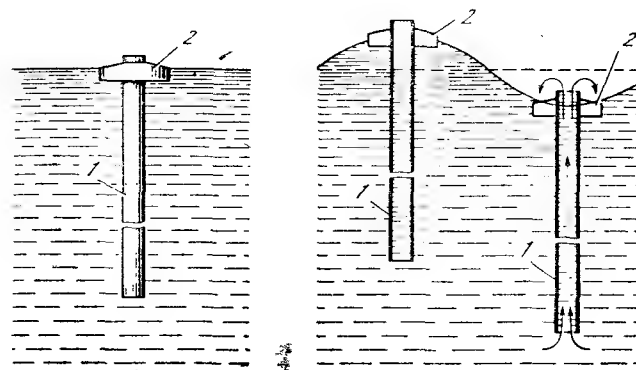


Рис. 21. Волновой насос для подъема глубинной воды в поверхностный слой

Средний расход воды, вытекающей из верхнего конца трубы 1, когда он находится во впадине между гребнями волн, может быть оценен по приближенной формуле

$$\begin{aligned} G_{\text{ср}} &= \mu S V_{\text{ср}} = \mu S \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \sqrt{2gA} \sin \omega t \, dT = \\ &= \mu S \frac{1}{T\omega} \int_0^{\pi} \sqrt{2gA} \sin \omega t \, d(\omega t) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \sqrt{gA} \int_0^{\pi} \sqrt{\sin X} \, dX, \end{aligned}$$

где $G_{\text{ср}}$ — средний расход воды, м³/с; μ — коэффициент расхода, учитывающий потери на входе и выходе трубы; S — площадь поперечного сечения трубы, м²; $V_{\text{ср}}$ — средняя скорость подъема воды в трубе за период волны, м/с; A — амплитуда поверхностной волны, м; T — период волны, с.

Входящий в последнее выражение интеграл находим с помощью гамма-функций:

$$\int_0^{\pi} \sqrt{\sin X} \, dX = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(3/4)}{\Gamma(5/4)} = \frac{1,77 \cdot 1,225}{0,906} = 2,26.$$

Получаем

$$G_{\text{ср}} = \frac{2,26}{\sqrt{2}\pi} \mu S \sqrt{gA}.$$

Так как

$$2,26/\pi\sqrt{2} = 0,51,$$

то окончательно имеем

$$G_{cp} = 0,51 \mu S \sqrt{Ag}.$$

Приближенный расчет по последней формуле показывает, что труба с внутренним диаметром 1,2 м ($S=1 \text{ м}^2$), длиной 100 м, установленная на подходящем поплавке в районе океана, характеризующемся средней амплитудой волн 0,85 м (полная высота 1,7 м, что близко к средней величине для Мирового океана) при периоде 6 с и коэффициенте расхода 0,7, обеспечит расход воды, равный $1 \text{ м}^3 \text{ с}$, что составит свыше 85 тыс. м^3 в сутки. Цифра эта очень велика. Однако фактический расход воды будет меньше вычисленного, так как интеграл был взят за всю отрицательную половину периода поверхностной волны, тогда как на самом деле вода будет фонтанировать значительно меньшую часть полупериода из-за потерь давления в трубе.

В гидравлике потеря давления (или напора) в трубах обычно характеризуется в метрах водяного столба и зависит от длины трубы, ее диаметра, шероховатости ее стенок и скорости течения воды в ней. Чтобы оценить величину потери напора по длине трубы, прежде всего следует рассчитать коэффициент сопротивления трубы:

$$r_1 = \xi l_r / d,$$

где ξ — коэффициент шероховатости (для новой чугунной трубы его значение приближенно равно 0,02); l_r — длина трубы, м; d — диаметр трубы, м. Для нашего примера $l_r=100 \text{ м}$, $d=1,2 \text{ м}$.

$$r_1 = 0,02 \cdot 100 / 1,2 = 1,67.$$

Потерю напора из-за трения на всей длине трубы найдем по формуле

$$\Delta_1 = r_1 V_{cp}^2 / 2g,$$

где V_{cp} — скорость воды в трубе, м/с.

В нашем случае $V_{cp}=1 \text{ м/с}$, поэтому

$$\Delta_1 = (1,6 \cdot 1^2) / (2 \cdot 9,81) = 0,08.$$

Потери напора при входе воды в трубу определяются по формуле

$$\Delta_2 = r_2 (V_{cp}^2 / 2g),$$

где r_2 — коэффициент сопротивления при входе в трубу принимается равным 0,5. Он обусловлен сжатием струи при входе и последующим ее расширением внутри трубы, на что и расходуется напор.

Для нашего примера потеря напора при входе

$$\Delta_2 = 0,5 (1^2 / 2 \cdot 9,81) = 0,025 \text{ м}.$$

Потеря напора при выходе струи из трубы

$$\Delta_3 = r_3 (V_{cp}^2 / 2g),$$

где r_3 — коэффициент сопротивления при выходе струи из трубы в воздух; примем его равным 1.

Тогда

$$\Delta_3 = 1 (1^2 / 2 \cdot 9,8) = 0,05 \text{ м}.$$

Полная потеря напора определяется суммой трех потерь, т. е. $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0,08 + 0,025 + 0,05 = 0,155 \text{ м}$.

При синусоидальных колебаниях трубы по вертикали во время прохождения ложбин вода из трубы не будет выходить до тех пор, пока она вместе с поддерживающим поплавком не опустится ниже среднего уровня спокойного моря на величину, равную суммарной потере напора, т. е. в нашем случае до 0,155 м. Вода будет продолжать течь во время прохождения ложбин до тех пор, пока труба, пройдя отрицательный минимум, не дойдет до среднего уровня моря на величину суммарной потери напора, т. е. до 0,155 м. Очевидно, что из-за наличия потерь напора время подачи воды в течение прохождения ложбины уменьшается. Вода не пойдет по трубе, пока напор волны не превысит потери напора в трубе. Если амплитуда волны станет равна суммарной потере напора, подача воды прекратится.

Определим долю полупериода, в течение которой вода практически не будет подаваться из-за описанного эффекта. Половина периода имеет длительность π радиан, или 180° . Для рассмотренного примера она определится уравнением

$$\Delta = A \sin \omega t,$$

где A — амплитуда поверхностных волн, принятая равной 0,85 м.

$$\omega = 2\pi / T = 6,28 / 6 \approx 1.$$

Подставляя цифры, получаем

$$\sin \omega t = 0,155/0,85 = 0,183.$$

Окончательно находим

$$\omega t = 10^\circ 30'.$$

В точке, соответствующей этой цифре (или близкой к ней), вода начнет проходить через трубу и над ее выходным отверстием появится фонтанчик глубинной воды. Подача воды через трубу будет продолжаться до тех пор, пока текущее значение углубления ложбины, пройдя через максимум (отрицательный), снова не уменьшится до найденного значения высоты потери напора (0,155 м). Следовательно, вода не будет подаваться в течение удвоенного значения найденного промежутка (21°), или около $0,37$ радиана. Подсчет показывает, что примерно $11,5\%$ времени отрицательного полупериода (т. е. ложбины волны) волновой насос не работает. К этому надо прибавить еще и весь положительный полупериод, т. е. время прохождения гребня. Выходит, что большую часть периода поверхностных волн подобный волновой насос воду не качает.

Для труб меньшего диаметра результаты будут хуже. Например, для трубы с внутренним диаметром $0,27$ м и той же шероховатости коэффициент сопротивления $r_1 = (2 \cdot 10^{-2} \cdot 100)/0,27 = 7,4$.

Следовательно, суммарная потеря напора при прочих равных условиях станет вчетверо больше, т. е. $\Delta z = 0,62$ м, откуда определим

$$\sin \omega t = 0,62/0,85 = 0,73.$$

Окончательно найдем $\omega t = 47^\circ$; $2\omega t = 94^\circ$.

Подсчет показывает, что при трубе с внутренним диаметром $0,27$ м вода будет подаваться в течение времени меньше половины времени прохождения ложбины или меньше четверти полного периода поверхностной волны. Как показали эксперименты, такой простейший волновой насос действительно подает глубинную воду короткими импульсами. Хотя за волны платить не надо, но вряд ли можно признать подобное устройство эффективным. Значительно улучшить его эффективность можно введением клапана.

ИНЕРЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АЙЗЕКСА

Схема инерционного преобразователя американского ученого Д. Айзекса представлена на рис. 22. Преобразователь представляет собой вертикальную трубу 1, поддерживаемую на плаву с помощью буйа 2. Ниже уровня спокойного моря на глубине $6,1$ м в трубе имеется расширение, где помещен клапан 3. В верхней части трубы на бую расположен турбогенератор 4 и напорный бак 5; имеется также сливная труба 6. Буй слабо привязан, поэтому он непосредственно откликается на волновые движения, т. е. отслеживает поверхности уровня проходящих волн благодаря достаточно длинному якорному концу.

Клапан 3 закрыт примерно в течение половины периода волны, благодаря чему водяной столб в трубе поднимается вверх при подъеме буйа на гребень очередной волны. А когда буй начинает опускаться с гребня, сила инерции заставляет воду внутри трубы продолжать движение вверх, поднимая водяной столб выше, чем высота волны. Последующие периоды волн поднимают давление в напорном баке еще выше, пока не будет достигнуто значение, необходимое для работы турбогенератора 4. Последовательно набегающие волны поддерживают давление в напорном баке 5, откуда питается водой турбина. Отработанная вода, выходящая из турбины, сливается обратно в море через сливную трубу 6.

Вертикальное положение трубы 1 — наилучшее. Но инерционный насос будет работать и в том случае, если трубу расположить горизонтально или свить в спираль. Инерционный насос со спиральной трубой будет работать за счет качки судна-носителя (вспомним изобретение А. Г. Баранова).

Преобразователь с трубой длиной 61 м обеспечивает увеличение напора в 9 раз, а с трубой длиной 92 м — более чем в 20 раз. Такие результаты были получены при волнах высотой $1,8$ м. Расчет показывает возможность получения при этих условиях мощности около 50 кВт

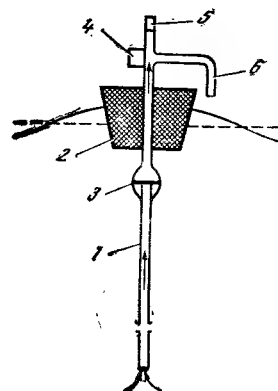


Рис. 22. Инерционный преобразователь Д. Айзекса

при трубе длиной 153 м и диаметром 92 см. Для трубы диаметром 460 см и длиной 90 м возможная мощность оценивается в 350 кВт (хорошая цифра, представляющая несомненный интерес). Энергетическая установка с подобной трубой будет иметь установочную стоимость примерно 300 долл. за 1 кВт, т. е. стоить всего приблизительно 105 тыс. долл. Это — дешево. Однако для установки мощностью в 20 кВт стоимость оценивается в 2 тыс. долл. за 1 кВт, т. е. полная стоимость установки в этом случае будет составлять примерно 40 тыс. долл. Столь значительная разница в цене связана с тем, что при неизменной длине трубы мощность возрастает приблизительно пропорционально квадрату диаметра трубы, тогда как стоимость поддерживающей конструкции — пропорционально диаметру трубы в первой степени. Эксплуатационные расходы в сильной степени будут зависеть от удачности конструкции в целом. Можно полагать, что при работе в глубоких водах в достаточном удалении от прибойной полосы волновые нагрузки на энергетическую установку будут немногим больше, чем на обычные буй.

По оценке Айзекса, эффективность использования энергии волн рассмотренным преобразователем составляет около 30 %. Цифра эта близка к КПД водоподъемных установок с тараном.

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИНЕРЦИОННОГО НАСОСА

Для любых применений волнового инерционного насоса весьма важна его производительность. Рассмотрим некоторые особенности ее расчета. Упрощенная схема инерционного насоса показана на рис. 23. Насос состоит из трех основных частей: буйа 1, водоподъемной трубы 2 и клапана 3. Буй поддерживает верхний конец трубы и отслеживает поверхность уровня проходящих поверхностных волн. По трубе глубинная вода подается наверх. Клапан на верхнем срезе трубы служит для автоматической синхронизации движения воды в трубе с прохождением поверхностных волн и обеспечения оптимального режима работы установки; полезен он также и для предотвращения заплескивания воды в трубу из поверхностного слоя во время прохождения гребней волн.

Для расчета производительности примем, что поплавковая система насоса, т. е. буй, точно отслеживает взвол-

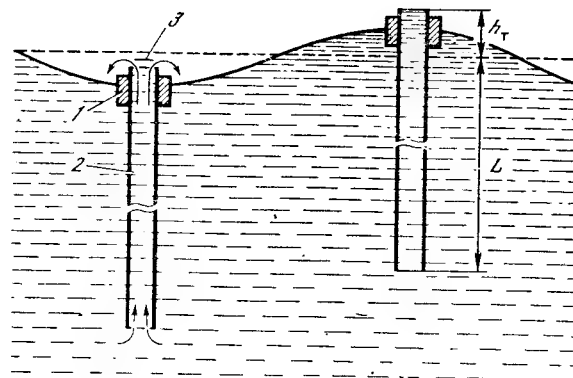
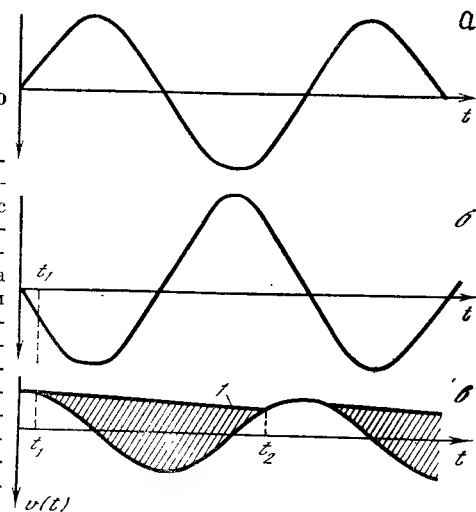


Рис. 23. Инерционный волновой насос

Рис. 24. Графики, иллюстрирующие работу инерционного волнового насоса:

a — изменение амплитуды поверхностных волн и одновременно колебаний буйа вместе с трубой, b — изменение волнового ускорения и одновременно ускорения водяного столба в водоподъемной трубе при закрытом клапане, c — изменение скорости водоподъемной трубы по вертикали соответствует изменению волновой скорости (t_1 — касательная к точке t_1 ; заштрихованная площадь определяет количество поднимаемой насосом воды)



нованную поверхность, колебания которой следуют закону синуса, т. е.

$$A(t) = -A_0 \sin \omega t,$$

где $A(t)$ — отклонение поверхности моря от среднего уровня, м; A_0 — амплитуда поверхностных волн, м; $\omega = 2\pi/T$ — угловая частота поверхностных волн, 1/с; T — период поверхностных волн, с; t — текущее значение времени, с.

Минус в формуле обусловлен выбором направления вниз в качестве положительного, что сделано для удобства последующих расчетов. График этой функции (рис. 24) представляет собой профиль поверхностных волн и одновременно он является графиком колебаний буй с подъемной трубой, поскольку мы приняли, что буй точно отслеживает поверхностные волны.

Для упрощения расчетов далее не учитываются потери напора на трение о стенки трубы, а также потери напора при входе потока в трубу, равно как и потери при выходе через клапан. Условно принимается постоянство массы волнового насоса и равенство нулю присоединенной к нему массы воды. Расчет производится для подъемной трубы достаточной длины, когда поле поверхностных волн на ее нижнем конце практически затухло и его влиянием можно пренебречь. С учетом всех перечисленных замечаний уравнение движения воды в трубе при только что открытом клапане имеет вид

$$S\rho(L+h_T)\ddot{Y}=S\rho h_T g,$$

где S — площадь поперечного сечения трубы, м^2 ; ρ — плотность воды; L — длина подводной части трубы, м ; h_T — длина (высота) надводной части трубы, м ; $\ddot{Y}=d^2Y/dt^2$ — ускорение водяного столба в трубе, $\text{м}/\text{с}^2$; Y — смещение водяного столба в трубе по вертикали, м ; g — ускорение силы тяжести.

Физический смысл последнего уравнения заключается в том, что сила инерции всего колеблющегося столба воды в трубе (левая часть уравнения) приравнивается весу столба воды в надводной части трубы (правая часть уравнения). Уравнение отражает второй закон Ньютона, который, как известно, гласит, что действующая сила есть произведение массы на ускорение. В нашем случае сила инерции используется на преодоление силы веса столба воды в надводной части трубы. Подводная часть столба воды в трубе практически веса не имеет. Когда клапан закрыт, ускорение столба воды в трубе совпадает с ускорением буй, так как труба с ним жестко связана, а разрыв столба воды в трубе принимается невозможным, поскольку ускорение буй при колебаниях всегда меньше ускорения свободного падения. Принимается также, что клапан имеет идеальную конструкцию, исключающую подсос воздуха в моменты подъема всей установки на гребни волн.

Для определения производительности инерционного

волнового насоса найдем из последнего уравнения ускорение водяного столба в трубе:

$$\ddot{Y}=d^2Y/dt^2=gh_T/L+h_T.$$

Насос начнет подавать воду при открытии клапана. Открытие клапана произойдет, когда ускорение водяного столба в трубе будет равно ускорению самой трубы, или, что то же самое, ускорению буй, к которому труба прикреплена. Точнее — тарелка клапана имеет некоторый вес, поэтому для его преодоления потребуется несколько большее ускорение водяного столба. Но мы в расчете пренебрежем весом тарелки клапана.

Поскольку было принято, что буй с трубой точно отслеживают поверхностные волны, то ускорение трубы найдем по формуле для ускорения частиц воды в поверхностных волнах. Так как мы приняли волны синусоидальными, то вторая производная, определяющая ускорение при синусоидальных колебаниях

$$a_\lambda=d^2A/dt^2=A_0\omega^2\sin\omega t.$$

График изменения ускорения во времени представлен на рис. 24, б. Согласно этому графику происходят изменения вертикального ускорения в частицах воды поверхностных волн и одновременно ускорения движения водяного столба в колеблющейся по вертикали водоподъемной трубе инерционного насоса, пока закрыт клапан. Кривая изменения ускорения (рис. 24, б) сдвинута на 180° по отношению к графику изменения высоты поверхностных волн (рис. 24, а), как это и следует из теории колебаний.

Клапан откроется в момент t_1 , когда сравняются ускорения трубы и водяного столба в ней, т. е. будет выполнено равенство

$$A_0\omega^2\sin\omega t=gh_T/L+h_T.$$

Этот момент отмечен на графике точкой t_1 . Клапан будет оставаться открытым до тех пор, пока скорость воды в трубе не сравняется со скоростью движения самой трубы, или, что то же самое, со скоростью движения буй по вертикали. На графике изменения скорости трубы по вертикали (рис. 24, в) момент закрытия клапана обозначен точкой t_2 .

Момент закрытия клапана (t_2) определяется из условия равенства скоростей поплавковой системы волнового насоса и столба воды в подъемном трубопроводе, которое

может быть записано в виде

$$\int_{t_1}^{t_2} g_{\lambda}(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Y} dt.$$

Подставляя в последнее уравнение выражения для волнового ускорения $g_{\lambda}(t)$ и ускорения столба воды $\dot{Y}$, после интегрирования получаем

$$-A_0 \omega \cos \omega t_2 + A_0 \omega \cos \omega t_1 = \{gh_{\tau}/(h_{\tau} + L)\}(t_2 - t_1).$$

Результирующее смещение столба воды в подъемном трубопроводе за один период волны определяется по формуле

$$\Pi = \int_{t_1}^{t_2} \Delta V(t) dt,$$

где $\Delta V(t) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Y} dt - \int_{t_1}^{t_2} g_{\lambda}(t) dt = [gh_{\tau}/(h_{\tau} + L)](t_2 - t_1) + A_0 \omega \cos \omega t_2 - A_0 \omega \cos \omega t_1$ — разность скоростей подъемного трубопровода и столба воды в нем.

Объем воды, поднятый с глубины и прошедший через клапан за один период волны, рассчитывается следующим образом:

$$O_{H_2O} = S\Pi.$$

В экспедиции ВНИРО и ИОАН на Черном море была испытана установка искусственного апвеллинга с трубой длиной 22 м. Результаты испытаний дали близкие к расчетным значения производительности установки. Об эффективности установки свидетельствуют и данные химического анализа поверхностной и глубинной воды (в мкг-ат.л): кремний — 3,5 на поверхности, 10,1 в глубине; нитраты — соответственно 0,11 и 0,94; аммоний — 0,27 и 1,68; фосфор минеральный — 0,98 и 0,35.

ВОДОРОДНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Новый принцип преобразования энергии поверхностных волн предложил в 1978 г. Р. Сэломон; позже эта идея была развита им в совместной работе с Хэрдингом. Принцип действия их преобразователя виден из рис. 25.

Преобразователь представляет собой цилиндр 1, неподвижно укрепленный на морском дне и наполненный водородом. В цилиндре перемещается поршень 2. В средней части цилиндр перегороден пористой перегородкой

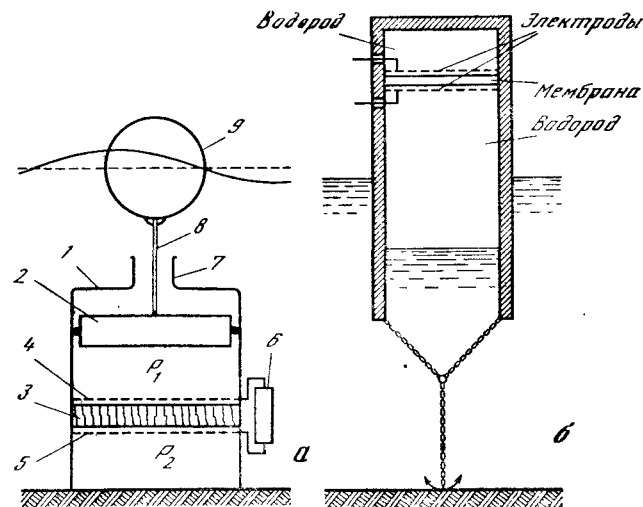


Рис. 25. Преобразователи энергии поверхностных волн, работающие на принципе действия водородного гальванического элемента. Во втором варианте (справа) поршень отсутствует, вместо него работает столб воды, поднимающийся или опускающийся в цилиндре под действием проходящих волн

(мембраной) 3, до которой поршень при своем движении не доходит. На верхней и нижней плоскостях перегородки имеются проводящие электроды 4 и 5 с выводами к полезной нагрузке 6. В верхней части цилиндра расположен сальник 7, через который проходит шток 8. Сальник необходим для предотвращения попадания воды в цилиндр, а также для исключения утечки из него водорода. Шток связан с поплавком 9, находящимся на поверхности воды.

Под действием поверхностных волн поплавки совершают вертикальные колебания. Усилие от поплавка через шток передается поршню 2, который поэтому также колеблется синхронно (и синфазно) вверх и вниз, вызывая тем самым периодические повышения или понижения давления водорода в цилиндре. Пористая мембрана-перегородка обладает особыми свойствами: она имеет протонную проводимость. В качестве материала для мембраны Сэломон применил разработанный им новый материал — синтетический полимер нафийон; это самая важная деталь нового преобразователя.

Когда в верхней части цилиндра при движении поршня вниз повышается давление водорода, на поверхности

мембраны из наффона происходит разложение молекул водорода. Точный ход реакции не описан. Можно предполагать, что реакция идет по уравнению



Протоны H^+ проникают в мембрану, а электроны улавливаются электродом 4 и текут в нагрузку 6, совершая там полезную работу как обычный электрический ток. Цепь тока замыкается через нижний электрод 5 (плюс при прохождении ложбин поверхностных волн), на котором происходит компенсация протонов.

При прохождении гребней поверхностных волн поршень движется вверх, благодаря чему объем между поршнем и мембраной возрастает и образуется разрежение. Поэтому концентрация водорода здесь понижается. При этом процесс повторяется, но с обратным знаком. Протоны из нижней полости цилиндра (ниже мембраны) пройдут через мембрану, а электроны будут собраны нижним электродом 5 и потекут в нагрузку 6. Направление тока на этой фазе волны будет обратным — плюсом станет верхний электрод 4. Таким образом, водородный преобразователь будет генерировать переменный ток с частотой поверхностных волн.

Генераторная часть описываемого преобразователя является концентрационным гальваническим элементом: он производит электрический ток только тогда, когда концентрация водорода различна на верхней и нижней сторонах мембраны. Разность в концентрации водорода возникает благодаря движению поршня, т. е. благодаря работе волн. Согласно уравнению Нернста, электродвижущая сила такого генератора определяется формулой

$$E = \frac{RT}{2F\Phi} \ln \frac{P_1}{P_2} \text{ В},$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; $F\Phi$ — константа Фарадея; P_1 и P_2 — давление соответственно в верхней и нижней части цилиндра.

Для ориентировочного подсчета величины генерируемой ЭДС примем следующие значения величин, входящих в уравнение Нернста: $T=300 \text{ К}$; $R=8,47 \text{ Дж/град}$; $F\Phi=9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/г-эквивалент}$; $P_1=10 \text{ атм}$; $P_2=1 \text{ атм}$. Получаем

$$E = \frac{8,47 \cdot 300}{2 \cdot 9,65 \cdot 10^4} \ln 10/1 = 30 \text{ мВ}.$$

Анализ уравнения Нернста оставляет мало надежды на значительное увеличение генерируемой электродвижущей силы. Газовая постоянная и константа Фарадея неизменны, а значительно повышать температуру преобразователя также практически затруднительно. Некоторые возможности повышения ЭДС имеются за счет увеличения отношения давлений в верхних и нижних частях рабочего цилиндра. Например, при увеличении отношения P_1/P_2 до 100 натуральный логарифм отношения возрастает до 4,6 (вместо 2,3). Следовательно, при прочих равных условиях ЭДС также возрастет вдвое и станет 60 мВ. Если поднять отношение давлений еще на порядок, т. е. довести его до 1000, то натуральный логарифм будет 6,9, а ЭДС возрастет в этом случае почти до 0,1 В. Возможности силового поля поверхностных волн в принципе позволяют получить достаточно большие усилия на штоке для обеспечения необходимого давления на поршень. Дело в объеме поплавок, поскольку полезная работа в цилиндре будет совершаться за счет сил плавучести в поле поверхностных волн. Возможность использования больших градиентов давления зависит от механических характеристик пленки наффон.

Но имеется и другая возможность увеличения генерируемой ЭДС. Речь идет о последовательном соединении нескольких преобразователей рассмотренного типа. Соединив последовательно несколько десятков таких устройств, можно повысить ЭДС в необходимое число раз. Подобное соединение, вероятно, можно будет осуществить в одном цилиндре, разместив там особую ячеистую структуру с нужным числом элементов, соединенных в группы как последовательно, так и параллельно. Таким путем можно получить необходимую мощность.

Для каждой конструкции преобразователя имеется оптимальное количество водорода. Увеличение массы водорода выше этого значения приведет к снижению эффективности. Весьма важным является также вопрос о внутреннем электрическом сопротивлении каждого преобразователя.

Эффективность энергии волн при использовании наффона составляет 25 %. Кроме описанного варианта с поршнем, имеются и другие варианты подобных преобразователей.

ПЛАМЯ НАД ВОЛНАМИ

В декабре 1977 г. в «Вечерней Москве» была помещена такая заметка:

«Пламя на волнах

Дели. Индийские ученые, изучающие последствия беспрецедентного по силе тропического циклона, который обрушился 19 ноября 1977 г. на прибрежные районы штата Ассам, столкнулись с трудно объяснимым явлением. Очевидцы утверждают, что огромные волны, которые нес из океана ураганный ветер, были как бы охвачены красным пламенем.

Представитель департамента науки и техники Индии Н. Р. Кришнан высказал следующее предположение: энергия циклона была настолько велика, что, возможно, временами при скорости ветра в 200 км в час, при грозе и урагане происходил распад молекул воды на атомы кислорода и водорода, а электрические разряды воспламенили водород»²².

Фантастическое сообщение! Водород — признанное топливо будущего. Если волны, пусть очень мощные, пусть с помощью ураганного ветра и грозы, способны сами разлагать молекулы воды на составные части, то зачем искать иные способы использования энергии волн? Ведь все известные преобразователи энергии волн в электроэнергию сложны и дороги. А здесь прямо из волн сам выделяется водород! Но возможно ли в действительности разложение молекул воды в волнах под действием урагана? Ничего подобного раньше, как будто, никто не наблюдал. А может быть, это «красный прилив» — так называется редкое явление, когда волны окрашиваются в красный цвет благодаря большому количеству в воде особых планктонных организмов.

Довольно широко известно свечение морских одноклеточных организмов, в частности ночесветок, — так называемая биологическая люминесценция. Это — холодное свечение, возникающее при окислении особого вещества, выделяемого светящимися животными. Процесс биологической люминесценции отличается очень высокой световой отдачей — его КПД близок к 100%! Это означает, что почти вся химическая энергия реагирующих веществ превращается в свет. Например, у берегов Приморского края 1 л морской воды с двумя тысячами ночесветок дает достаточно света, чтобы ночью читать газету.

Биолюминесценция морских животных служит методом изучения специалистов. Кроме того, ею широко

пользуются как методом количественной оценки биомассы в глубоководных районах Мирового океана. Этот метод оценки удобен тем, что при его применении не требуется буксировать планктонную сеть и отлавливать, а потом долго считать пойманных морских животных. Биомасса оценивается по числу световых импульсов, регистрируемых фотоумножителем, буксируемым в глубине за судном. Фотоумножитель вместе со схемой питания помещается в прочный герметичный кожух с прозрачным плексигласом. Электрические импульсы от фотоумножителя по кабелю передаются в автоматическое счетное устройство на борту судна. Метод этот, развитый советскими учеными (основная заслуга в его разработке принадлежит члену-корреспонденту АН СССР И. И. Гительзону), очень удобен для учета количества морских животных в глубинах океана.

В Мировом океане имеется и другой вид световых явлений — редкий, не изученный и таинственный. Вот, например, что увидела команда советского экспедиционного судна «Владимир Воробьев» во время плавания в 1977 г. в Аравийском море: «Выполняя океанографические исследования, команда вдруг заметила, что вокруг судна в радиусе 150—200 м вращалось против часовой стрелки яркое белое пятно, распадаясь на восемь частей. Эхолот зафиксировал глубину места 170 м, одновременно показал присутствие под килем некой массы на глубине примерно 20 м».

Этот случай заинтересовал секцию подводных исследований Океанографической комиссии Академии наук СССР. «„Дорасследование“ показало, что в момент, предшествующий наблюдению, вышел из строя электрогенератор, дающий питание на траловую лебедку. А вокруг судна наблюдались строго повторяющиеся вспышки какого-то неестественного света. Свет пробегал волнами в форме восьми вращающихся загнутых лучей, напоминающих лопасти турбины. Через полчаса свечение ослабло, а диаметр „колеса“ уменьшался до 80—100 м»²³.

Что это было? На этот вопрос наука ответа не дает, хотя подобные явления в океане и в атмосфере над ним известны с давних пор. Академик А. Н. Крылов назвал их в свое время «призраками» океана.

В 1983 г. появилось новое сообщение об огне над волнами у побережья Индии.

²² Вечерняя Москва, 1977 г., 17 дек.

²³ Круги в океане. — Неделя, 1977, № 18 (894).

«Разгадка тайны „красных волн“

Среди рыбаков индийского штата Андхра-Прадеш давно существовала легенда о „красных волнах“. При ураганных ветрах, которые гонят огромные массы воды на берег, верхушки самых больших волн как бы вспыхивают красным огнем. При этом они еще и «рычат», заглушая вой ветра.

Ученым удалось наблюдать редкое явление, когда ураган исповинской силы обрушился на берег. Действительно, над огромными волнами возникали вспыхивающие яркие красного пламени. Легенда не оказалась вымыслом.

Пытаясь объяснить подмеченный природный эффект, ученые Индии выдвинули несколько гипотез. Одна из них утверждает, что при ветре, скорость которого приближается к 200 км/ч, происходит распад капель воды. Молекулы разлагаются на атомы водорода и кислорода. Атмосферные электрические разряды воспламеняют гремучий газ, и волны приобретают свою загадочную окраску»²⁴.

Здесь содержатся подробности, которых не было в первом сообщении. Например, что светящиеся волны «рычат», что это явление издавна известно среди местных рыбаков, а теперь его наблюдали ученые.

Давайте подсчитаем, может ли в действительности происходить распад молекул воды на составные атомы при ураганном ветре, скорость которого приближается к 200 км/ч. Чтобы ответить на этот вопрос, прежде всего необходимо узнать, какую энергию надо приложить к молекуле воды, чтобы получить желанный эффект, т. е. разложить ее на водород и кислород. Величина эта называется энергией диссоциации молекулы воды. Она должна быть равной той энергии, которая выделяется при сгорании молекулы водорода в кислороде.

Соединение водорода с кислородом идет по уравнению $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 137 \text{ Ккал}$, т. е. 137 Ккал выделяется при образовании двух молей воды. Два моля — это 36 г воды. В каждом моле содержится $6 \cdot 10^{23}$ молекул — число Авогадро. Найдём энергию, приходящуюся на одну молекулу воды:

$$\frac{137 \text{ Ккал}}{2 \cdot 6 \cdot 10^{23}} = 1,14 \cdot 10^{-22} \text{ Ккал, или } 1,14 \cdot 10^{-19} \text{ кал.}$$

Для удобства дальнейших расчетов переведем найденное значение энергии диссоциации из тепловых единиц (калорий) в джоули. Одна калория соответствует 4,19 Дж. Тогда при образовании одной молекулы воды получим энергию: $1,14 \cdot 10^{-19} \text{ кал} \cdot 4,19 = 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Подсчитаем, какую скорость ($V_{\text{H}_2\text{O}}$) надо сообщить молекуле воды,

чтобы она приобрела подобную энергию. Но сначала найдём массу одной молекулы воды ($m_{\text{H}_2\text{O}}$). Для этого разделим массу одного моля воды (т. е. 18 г) на число Авогадро: $m_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г} \cdot 6 \cdot 10^{23} = 3 \cdot 10^{-23} \text{ г} = 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$. Теперь приравняем найденную энергию диссоциации к необходимой кинетической энергии молекулы воды, т. е. $4,8 \cdot 10^{-19} = (m_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}}^2) : 2$, откуда вычислим требующуюся для достижения энергии диссоциации скорость молекулы воды:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^{-26}}} = \sqrt{33 \cdot 10^6} = 5 \cdot 750 \text{ м/с} = 20 \text{ 400 км/ч.}$$

Полученная цифра показывает, что для разложения молекулы воды на составные части — водород и кислород требуется космическая скорость. Ее не могут получить молекулы воды в штормовых волнах даже при сильном урагане с ветром около 200 км/ч. Необходима скорость примерно на два порядка выше.

Выполненный расчет имеет ориентировочный характер, но все же он убедительно свидетельствует, что еще рано говорить о разгадке тайны «красных волн». Если такие волны действительно есть, то распад молекул воды в них происходит за счет какого-то другого физического явления. Рассмотрим один из возможных механизмов.

Речь идет о кавитации. Кавитацией называется образование пустот в жидкостях. Пустоты различной формы образуются под влиянием достаточно больших механических напряжений, разрывающих жидкость на короткое время. Затем происходит быстрое сжатие. Вот тут-то и возникают различные процессы, богатые энергией, иногда приводящие к самым неожиданным результатам.

Кавитация давно известна судовым механикам — она вызывает разрушение гребных винтов. На лопастях винтов сначала появляются как будто следы от оспы — сетка мелких впадин. Потом разрушение увеличивается, появляются дырки. Если не принять вовремя необходимых мер, гребной винт судна разрушится. Примерно то же происходит с лопатками турбин, в аппаратах, направляющих потоки жидкости, в соплах. Кавитацией легко разрушаются прочные материалы под действием ударных импульсов давления, возникающих при захлопывании кавитационных пустот.

Начальная амплитуда импульсного давления при кавитации в воде может превышать 10 тыс. ат. Такую цифру дает расчет по формуле Рэлея. Ударный процесс проте-

²⁴ Вокруг света, 1983, № 6, с. 15.

кает в короткое время, определяемое несколькими микросекундами. Не приходится удивляться, что воздействие такими импульсами приводит к разрушению самых прочных металлов.

Физики различают два типа кавитации: акустическую и гидродинамическую. Акустическая кавитация наблюдается в поле ультразвуковых волн. На сегодня она лучше изучена, чем гидродинамическая. При схлопывании кавитационных полостей, вызванных ультразвуком, освобождается энергия, дающая необычные эффекты. Например, наблюдается свечение воды, в том числе морской. Вода светится под действием ультразвуковых волн.

Свечение воды при ультразвуковой кавитации связано с ионизацией, вызванной электрическими зарядами, образующимися на стенках кавитационной полости при разрыве сплошности. По расчетам Я. И. Френкеля, напряженность электрического поля в кавитационной полости достигает 600 В/см. Этого напряжения достаточно, чтобы вызвать разряд в условиях пониженного давления, имеющегося в полости. Однако энергия, требующаяся для появления свечения воды, очень мала. Расчет показывает, что на это требуется не более 10^{-5} энергии, потребной для диссоциации молекулы воды (что не удивительно, поскольку электролюминесцентные процессы свечения, как известно, очень экономичны).

Интересно отметить, что кавитация в воде всегда сопровождается шипящим шумом, напоминающим шум кипящей воды (волны «рычат»). Но для нас гораздо больший интерес представляют данные о появлении в воде, благодаря ультразвуковой кавитации, радикалов ОН и Н (диссоциация молекул воды с образованием радикалов под действием ультразвуковой кавитации наблюдалась рядом авторов²⁵). Реакция должна идти по уравнению: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH} - 117,8 \text{ Ккал/моль}$. Кислород при облучении не образуется, а образовавшиеся свободные радикалы, как было установлено, являются первопричиной окисляющего действия ультразвука.

Следует отметить, что диссоциация связи Н—ОН в молекуле воды требует меньше энергии, чем полная диссоциация молекулы на водород и кислород. По литературным данным, на диссоциацию связи Н—ОН требуется лишь 117,8 Ккал/моль. Эта цифра составляет лишь 86 %

от полной энергии диссоциации молекулы воды. Важнейший вывод состоит в том, что ультразвуковая кавитация способна передавать подобную энергию молекулам воды.

Однако на берегах океанов еще никто не обнаруживал ультразвуковых колебаний. Там были найдены лишь инфразвуковые колебания, получившие известность под названием «голоса моря» (иногда интенсивность этих колебаний достигает довольно больших значений — около 100 дБ, т. е. близка к силе шума, производимого реактивным самолетом). Но ускорение частиц при инфразвуковых колебаниях мало даже при большой амплитуде колебаний. Поэтому инфразвук не образует кавитации.

Возникает вопрос — каким путем в прибрежных волнах могут образоваться кавитационные полости? Откуда возьмутся силы, способные разорвать волны? Ответим так: волна создает их сама. Точнее — может создавать при набегании на препятствие с острыми кромками. Поясним эту мысль следующими примерами; речь пойдет о гидродинамической кавитации.

В теоретической гидродинамике рассматривается случай обтекания потоком воды диска эллиптического сечения²⁶. При диаметре диска 100 см и наибольшей толщине в центре 1 см радиус кривизны его эллиптической кромки $R_k = a_s^2/b_s = (0,5)^2/50 = 0,25/50 = 0,005 \text{ см}$ (где a_s , b_s — малая и большая полуоси эллипса, равные соответственно 0,5 и 50 см). Пусть на диск набежит поток воды по нормали к его поверхности. Начальную скорость потока V_n примем равной 100 см/с (вдалеке от диска). Центробежное ускорение потока на кромке диска определим по формуле

$$a_d = V_n^2/R_k = 100^2/0,005 = 20\,000 \text{ м/с}^2.$$

Найденная величина ускорения потока превышает нормальное значение ускорения силы тяжести больше чем в 2 тыс. раз. Центробежная сила, возникающая при обтекании диска, превосходит силу тяжести в две с лишним тысячи раз. Совершенно очевидно, что поток воды не сможет точно обогнуть острую кромку такого диска, произойдет отрыв струй от кромки и возникнет нарушение сплошности потока, т. е. кавитация.

Но откуда на индийском берегу возьмутся диски с острой кромкой? В связи с этим сомнением отметим, что кавитация в прибойной зоне возможна и при значительно

²⁶ См.: Основные проблемы сопротивления воды движению судов. М.: Оборонгиз, 1939, с. 55.

²⁵ См.: Бергман А. Ультразвук. М.: Изд-во Иностран. лит., 1957, с. 521.

менее острых кромках обтекаемого тела. Возьмем радиус кривизны обтекаемого препятствия в 1000 раз больше, т. е. не 0,005, а 5 см. Встретить скалы на морском берегу с подобными тупыми гранями — не редкость. Примем, что волны имеют амплитуду $A \approx 3,5$ м, период $T = 10$ с. Найдем орбитальную скорость частиц воды.

$$V_0 = 3,5 \cdot 2\pi / T = 3,5 \cdot 6,28 / 10 = 2,2 \text{ м/с} = 220 \text{ см/с}.$$

Центробежное ускорение при такой скорости на кромке с радиусом кривизны $R_k = 5$ см будет

$$a_d = V_0^2 / R_k = (2,2)^2 / 5 \cdot 10^{-2} = 100 \text{ м/с}^2,$$

т. е. примерно в 10 раз больше ускорения силы гравитации. Следовательно, при набегании волн на подобное, вполне реальное препятствие также возможна кавитация. Параметры волн, принятые в последнем примере, не являются исключительными. Такие волны не так уж редко встречаются и у наших берегов во время сильных штормов. Однако никто не наблюдал пламени над ними. . .

А какова высота светящихся и рычащих волн, каков их период, какой берег в штате Андра-Прадеш? К сожалению, ничего этого мы не знаем. Но, может быть, дело в особом типе кавитации, имеющем место только там благодаря особым физико-географическим условиям?

В 1940 г. Я. И. Френкель считал, что при гидродинамической кавитации невозможна ионизация. В качестве доказательства приводилось отсутствие свечения жидкости при истечении из сопла. Объяснялось это относительной медленностью процесса и особой формой пузырьков при гидродинамической кавитации. Но, насколько известно, ни тогда ни теперь не создавались экспериментальные установки, в которых можно было бы воспроизвести физические условия, возникающие при ударе мощных штормовых волн. К этому можно еще прибавить отсутствие работ по влиянию гидродинамической кавитации на ионное равновесие воды. Вероятно, сейчас никто не сможет ответить на вопрос о возможности появления свободных радикалов под действием мощной гидродинамической кавитации. И тем более — на вопрос о возможности полной диссоциации молекулы воды. Гидродинамическая кавитация относится к числу еще недостаточно изученных явлений. Поверхностные волны при сильных штормах очень богаты энергией: зарегистрированы волны, несущие более 1000 кВт на 1 м длины фронта. Распределенная

по всей массе волны, эта энергия способна лишь все крушить на своем пути.

Но способна ли гидродинамическая кавитация сконцентрировать хотя бы часть энергии волн до степени, необходимой для диссоциации молекул воды? Каков должен быть механизм этого процесса? Игруют ли роль в этом процессе атмосферные электрические разряды? О том, что сами молнии способны разлагать водяные пары на кислород и водород, в печати были сообщения. Например, В. Жвирблис обратил внимание на то, что раскаты грома не похожи на сухой треск электрического разряда молнии. Согласно его гипотезе, басовитые раскаты грома вызваны взрывом гремучего газа, образовавшегося в канале молнии. Может быть, с аналогичным процессом связано «рычание» волн? Этот раздел хочется закончить цитатой: «И самое главное, что часто новые экспериментальные факты, какими бы частными на первый взгляд они не казались, могут открывать новый взгляд на окружающий мир».

ПЕТРОПОМПА И ТУМБАЛЕНСЫ

Петропомпа — шведское изобретение. Аббревиатура эта образована из первых слогов фамилий двух шведских изобретателей Я. Перссона и П. Трофтена, предложивших новую конструкцию гидравлического преобразования²⁷. Принцип его действия основан на использовании достаточно длинного резинового шланга, армированного спиралью из стальной проволоки. При натягивании шланга его внутренний объем уменьшается. На верхнем и нижнем концах шланга установлены обратные клапаны. Если опустить нижний конец шланга в воду и периодически натягивать шланг, то он работает как цилиндр насоса. Такого рода помпы раньше успешно использовались для подъема воды из колодцев, а теперь их пытаются применить для создания электростанций, использующих энергию морских волн. Для достижения этой цели на поверхности моря с помощью якоря устанавливается буй, на котором закрепляется верхний конец шланга. Струя воды из шланга направляется в турбину, которая вращает электрогенератор. Чтобы получить достаточно мощную электростанцию, необходимо установить несколько тысяч таких

²⁷ См.: Сандберг Ц. Волновые электростанции обретают перспективу. — За рубежом, 1982, № 32 (1153), с. 21.

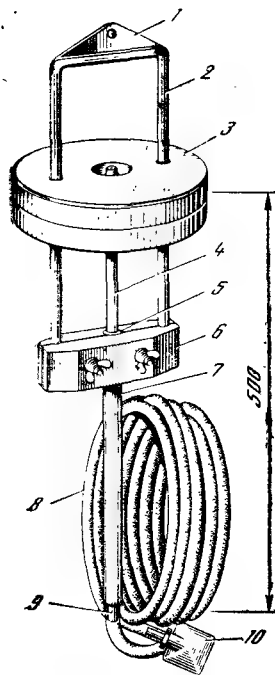


Рис. 26. Волновой насос типа Тумбаленс

в ближайшем будущем здесь же установить три насосных буй, которые будут подавать воду для небольшой турбины, смонтированной на маяке.

Тумбаленс — автоматическая помпа, качающая воду за счет энергии поверхностных волн (изобретатель Свен Тумба), получила широкое распространение в Норвегии для автоматической откачки воды из небольших судов²⁸. Принцип действия этой помпы поясняется с помощью рис. 26. Тумбаленс имеет раму 1 с отверстием и двумя направляющими 2, по которым может свободно перемещаться вверх-вниз круглый поплавок 3, сделанный из легкого пластика (типа пенопласта). Поплавок имеет шток 4 с поршнем на нижнем конце (на рисунке не виден). Поршень ходит в цилиндре насоса 7, закрепленном неподвижно в свинцовых щеках 6, которые одновременно

устройств в районах побережья, где море обычно неспокойно.

К числу преимуществ описанного преобразователя относятся простота конструкции, невысокая стоимость, отсутствие надобности в постоянном уходе и наблюдении, возможность постепенного наращивания мощности путем последовательного подключения отдельных блоков и, следовательно, отсутствие необходимости в одновременных больших капиталовложениях.

Трудности состояли в изготовлении шланга хорошего качества. Предполагается, что энергетическая установка с петропомпой сможет дать очень дешевую электроэнергию: стоимость 1 кВт·ч не будет превышать 1 шведскую крону (12 коп.).

Первая петропомпа была установлена в 1982 г. вблизи маяка Винга на подходе к Гётеборгу. Она качала воду лишь для измерительных целей. Планировалось

служат балластом, удерживая все устройство на плаву в вертикальном положении. В нижней части цилиндра насоса 7 расположен штуцер 9 с шариковым клапаном. Еще один шариковый клапан есть в теле поршня (как в любой всасывающей помпе); он пропускает воду к выходному отверстию верхней части цилиндра. На штуцер 9 надевается гибкий шланг 8 с заборником воды 10 на противоположном конце. Длина шланга 4,5 м; шланг перебрасывается внутрь лодки, а приемник воды помещается в точке, откуда надо откачать воду.

За отверстие в раме 1 тумбаленс подвешивается к борту лодки или к швартовому концу так, чтобы поплавков 3 оказался на поверхности воды примерно на половине высоты направляющих 2 при спокойном уровне моря. При наличии поверхностных волн поплавки совершают колебания по вертикали и движет шток с поршнем; насос откачивает воду. Трюмная вода выходит из отверстия 5 в верхней части цилиндра 7. В приемнике воды 10 имеется невозвратный клапан из подпружиненного шарика, он служит для предотвращения возможного сифонного эффекта, когда вода может пойти в обратном направлении, т. е. из моря в лодку.

Очевидно, на описанном принципе легко могут быть построены и более мощные устройства для различных целей.

²⁸ См.: «Тумбаленс» — автоматическая помпа. — Катера и яхты, 1977, № 2, с. 33.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОКЕАНА

ИДЕЯ Д'АРСОНВАЛЯ И РАБОТЫ КЛОДА

В 20-е годы нашего века многие журналы мира обошел странный рисунок (рис. 27): из-под киля судна в глубину уходила труба больше самого судна. Столь необычная труба понадобилась французскому ученому Жоржу Клоду для подъема из глубин океана холодной воды. Клод в те годы начал экспериментальные работы по использованию тепла океана для получения электрической энергии. Но чтобы извлечь энергию из теплой воды, одновременно необходима и холодная. Теплой воды сколько угодно на поверхности океана в тропиках, а холодная вода ($4-5^{\circ}\text{C}$) есть только на больших глубинах океана — около 1 км. Для ее получения оттуда и понадобилась длинная труба, которая оказалась самой уязвимой частью энергетической установки и отломилась во время шторма, а судно потерпело аварию.

Это была уже не первая попытка Клода использовать тепло океана для выработки электрической энергии. Перед опытом с трубой на судне он испытывал энергетическую установку на берегу океана (Атлантического). Но чтобы с берега достать холодную воду, потребовалась труба длиной около 1,8 км (по другим данным, 2,5 км). Потери напора в длинной трубе были так велики, что на них шла значительная часть мощности, которую могла выработать установка. Слишком длинная труба практически не позволяла реализовать прекрасную идею. Длину трубы можно было бы значительно сократить, если смонтировать установку не на берегу, а на судне, трубу же опустить прямо с судна в глубину. Что и было сделано. Однако конструкция не выдержала первого шторма.

Но главное было сделано — две недели установка проработала и дала мощность 22 кВт за счет тепла океана. Правда, на собственные нужды она потребила значительно больше. Однако правильность принципа была доказана — и в этом заслуга Клода. Надо сказать, что соединить с судном трубу длиной более полукилометра — далеко не простое дело. Удовлетворительно решить этот вопрос

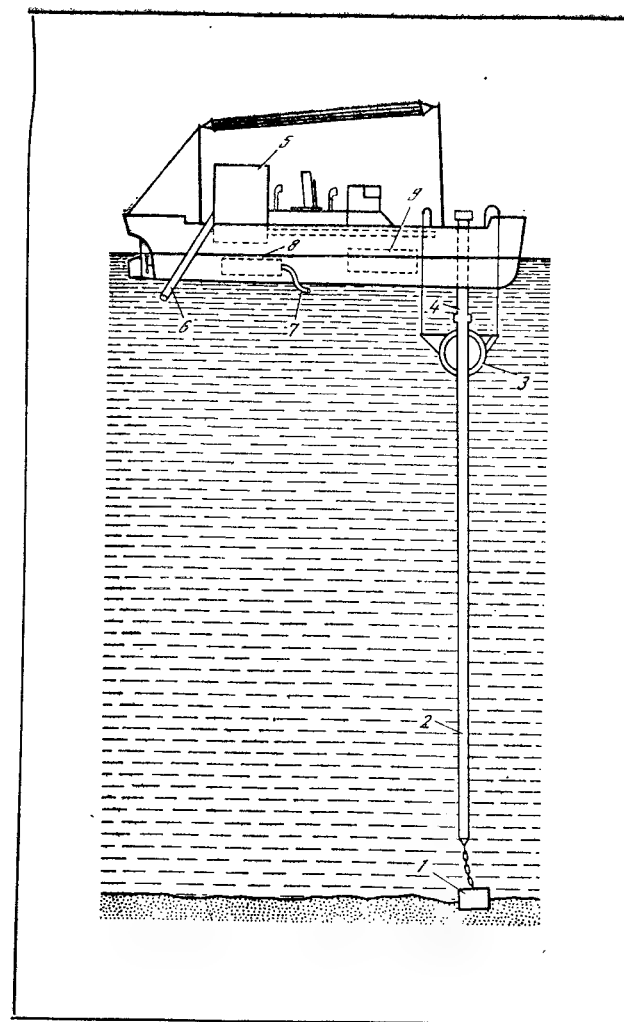


Рис. 27. Судно с трубой, на котором проводил эксперименты Ж. Клод

1 — якорный блок, 2 — трубопровод холодной воды, 3 — притопленный буй, поддерживающий трубу, 4 — место соединения труб, 5 — электростанция, 6 — выход отработанной воды, 7 — место забора теплой воды, 8 — фильтр теплой воды, 9 — оборудование для изготовления льда

удалось только в конце 80-х годов нашего века, когда была создана установка мини-ОТЕС.

Клод вместе с французским ученым Бушери сделали несколько попыток по созданию энергетических тепловых установок в разных частях Атлантического океана: в заливе Манганзас на Кубе, на побережье Абиджана и в прибрежных водах Бразилии. Но ни разу им не удалось получить из океана больше энергии, чем установка потребляла на собственные нужды, и поэтому для своей работы она требовала дополнительной энергии от вспомогательного источника. Эта печальная особенность отчасти была связана с малой мощностью установки, из-за чего различные потери составляли слишком высокий процент в общем балансе. Потеря оказалось больше, чем первоначально предполагалось.

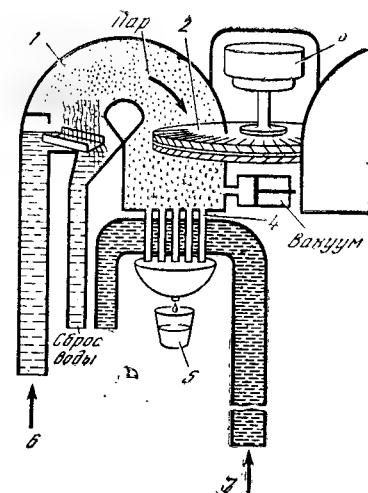
Первым обратил внимание на громадные запасы тепловой энергии в океане французский ученый Жак Д'Арсонваль более 100 лет назад (1881 г.) и теоретически показал возможность ее использования. Жоржа Клода называют его учеником, но между ними были серьезные разногласия в вопросе о выборе наилучшей жидкости в качестве рабочего тела для океанической тепловой машины. Этот вопрос надо было решить прежде всего. Рабочая жидкость должна закипать при температуре нагревателя, а пары ее после совершения работы в турбине должны сконденсироваться при температуре холодильника.

Нагреватель — теплая вода из верхних слоев океана. Наиболее высокая температура воды наблюдается в Персидском заливе в августе — более 33 °C (а самая высокая температура воды зафиксирована в Красном море — плюс 36 °C). Но на максимальную температуру рассчитывать преобразователь нельзя: она встречается на ограниченных участках Мирового океана, а обширные районы имеют температуру поверхностного слоя около 25 °C. Это достаточно высокая температура, при которой кипит многие жидкости. Д'Арсонваль предложил применить в качестве рабочей жидкости аммиак — жидкость с температурой кипения минус 33,4 °C, которая будет хорошо кипеть при 25 °C. При нормальной температуре (20 °C) аммиак — бесцветный газ с едким запахом. При повышении давления газообразный аммиак снова превращается в жидкость. При 20 °C для этого давление надо повысить до 8,46 атм, но при 5 °C — значительно меньше.

Выбор аммиака в качестве вторичного рабочего тела связан с отличными термодинамическими свойствами его

Рис. 28. Схема теплоэнергетической океанской установки открытого цикла

1 — испаритель, 2 — турбина, 3 — генератор, 4 — конденсатор, 5 — пресная вода, 6 — теплая вода из верхних слоев, 7 — холодная вода с больших глубин



паров. Пары аммиака имеют низкий молекулярный вес, достаточно большой удельный объем и хорошие характеристики теплопередачи. Они обеспечивают турбине вращение с большой скоростью, что очень важно. Благодаря этим качествам аммиак широко применяется в наши дни в энергетических установках, использующих тепло океанских вод. При этом схема тепловой энергетической установки должна быть замкнутой, т. е. после холодильника жидкий аммиак снова закачивается в нагреватель. Цикл непрерывно повторяется, пока работает установка. Количество рабочей жидкости, залитой в систему теплового преобразователя, практически не изменяется в процессе работы. Замкнутый цикл имеет ряд преимуществ перед открытым циклом, предложенным Клодом, благодаря чему он получил широкое применение в наши дни в установках ОТЕС.

Но Клод не захотел воспользоваться аммиаком. Он решил в качестве рабочей жидкости использовать морскую воду. Чтобы добиться ее кипения при температуре поверхностных вод в тропиках, создал в установке пониженное давление. Если понизить атмосферное давление в 15 раз, т. е. примерно до 50 мм рт. ст., морская вода закипит при температуре не выше 27 °C. Образовавшийся пар пойдет в турбину, заставит ее вращаться и вращать электрогенератор. А потом пар поступит в холодильник, где с помощью холодной глубинной воды превратится в пресную воду. Клод спускал ее в море: тогда она была никому не нужна. Такой цикл называется открытым, или незамкнутым.

Схема энергетической установки, работающей по этому принципу, представлена на рис. 28. По этой схеме была

построена первая экспериментальная установка Клода и Бушера.

При практической реализации установки ее авторы столкнулись с рядом специфических трудностей. Одна из первых — это создание низконапорной турбины. Дело в том, что давление водяного пара, получаемого при невысокой температуре в условиях частичного вакуума, мало. Чтобы снять сколько-нибудь заметную мощность, турбина должна иметь большие размеры. С этим затруднением Клоду и Бушера удалось справиться вполне удовлетворительно. Однако при первых же испытаниях обнаружилась неожиданность. При нагреве из морской воды в большом количестве выделялся растворенный в ней воздух, что повышало давление в системе и нарушало процесс кипения. Для поддержания достаточного разрежения систему приходилось непрерывно откачивать, на что требовалась дополнительная мощность. В результате уменьшался и без того небольшой КПД установки. С этой проблемой изобретателям не удалось справиться. Были и другие проблемы. Поэтому в последующие годы основное внимание ученых и инженеров обращалось на разработку тепловых преобразователей с замкнутым циклом. Итог их усилий — действующие ныне системы ОТЕС.

Но теперь, спустя более полувека, внимание снова привлечено к открытому циклу. «Открытый цикл вызывает огромный интерес. Он устраняет все проблемы, касающиеся обращения с аммиаком, фреоном и т. п. Пресная вода вырабатывается в качестве побочной продукции»¹, — считают американские специалисты. В США разрабатывается океанская энергетическая установка, которая одновременно с производством электроэнергии будет давать пресную воду — один из самых ценных в наше время продуктов, особенно в жарких и промышленных странах, где все острее ощущается ее недостаток.

Но остаются нерешенные проблемы, в частности создание больших низконапорных турбин и удаление из системы преобразователя выделяющегося из морской воды воздуха. Ближайшей задачей считается найти такой способ удаления воздуха, чтобы на него затрачивалось не более 10 % вырабатываемой энергии. Для ее решения в схему энергетической установки включается деаэратор — ка-

мера, в которой морская вода будет дегазироваться перед поступлением в нагреватель.

Теоретически оба вида преобразователей — с открытым и закрытым циклом — имеют близкие и одинаково малые коэффициенты полезного действия.

Примем температуру нагревателя $T_1 = 273 + 25 = 298$ К, температуру холодильника $T_2 = 273 + 5 = 278$ К. Согласно формуле Карно КПД будет равен

$$\eta_{\text{К}} = (T_1 - T_2) / T_1 = (298 - 278) / 298 = 0,067, \text{ или } 6,7 \, \%.$$

Полученная цифра еще недавно считалась близкой к теоретическому пределу КПД для океанской тепловой машины при принятых значениях температуры нагревателя и холодильника (как и для любой другой). Но недавно было показано², что из-за специфических особенностей преобразования энергии тепла в океане теоретический КПД теплового цикла в этом случае следует оценивать по формуле

$$\eta_0 = (T_1 - T_2) / (T_1 + T_2).$$

При малом значении разности температур $\Delta T = T_1 - T_2$ КПД океанской тепловой машины может быть вдвое меньше теоретического значения, вычисленного по формуле Карно, т. е.

$$\eta_0 = 1/2 \, \eta_{\text{К}}.$$

Поправка весьма существенная. Фактически КПД преобразователя в любом случае будет еще меньше из-за неизбежных потерь в теплообменниках, насосах, трубопроводах и др. Величина потерь будет зависеть от степени совершенства конструкции тепловой машины. Для преобразователей с замкнутым циклом реальным считается получение КПД в пределах до 2—3 %. Эти цифры близки к КПД отвергнутого паровоза. Но он сжигал драгоценное топливо, а здесь энергия вырабатывается за счет дарового тепла океана, топлива не требуется.

Интересно отметить переоценку значения малых цифр КПД, происшедшую за последние полвека. Пятьдесят лет назад теоретическое значение КПД около 7 % считалось

¹ И электростанция, и опреснитель воды. — За рубежом, 1984, № 28 (1253), с. 21.

² См.: Ильин А. К. Анализ условий максимального использования энергии воды в океанских ТЭС. — В кн.: Комплексные проблемы энерготехнологического использования морской воды: материалы 4-й Всесоюз. конф. «Проблемы научных исследований в области изучения и освоения Мирового океана», Владивосток; ДВНН, 1983, с. 116—118.

ничтожным и едва ли заслуживающим внимания. В наше же время строятся мощные океанские энергоцентралы с КПД примерно в половину этой величины. Существенного улучшения КПД можно ожидать только при использовании в океанских тепловых энергоцентралях большего перепада температуры между нагревателем и холодильником. Принципиально такая возможность имеется. В разных районах на дне океана обнаружены места, где разность температуры воды значительно превышает принятые для расчета 20 °С. Например, в термальных впадинах на дне Красного моря температура воды достигает 60 °С, к тому же она ежегодно несколько повышается. А на дне Тихого океана бьют гидротермальные источники с температурой более 350 °С, как в котле вполне современной ТЭЦ высокого давления. Вблизи от этих горячих источников имеется вода с низкой температурой, пригодная для холодильника. При использовании такой воды возможно получение КПД океанской установки, как у лучших наземных ТЭЦ высокого давления. Однако применение горячих гидротермальных вод для выработки электрической энергии потребует особой технологии.

СИСТЕМЫ ОТЕС

В августе 1979 г. вблизи Гавайских островов начала работать теплоэнергетическая установка мини-ОТЕС. Пробная эксплуатация установки в течение трех с половиной месяцев показала ее достаточную надежность. При непрерывной круглосуточной работе не было срывов, если не считать мелких технических неполадок, обычно возникающих при испытаниях любых новых установок. Ее полная мощность составляла в среднем 48,7 кВт, максимальная — 53 кВт; 12 кВт (максимум 15) установка отдавала во внешнюю сеть на полезную нагрузку, точнее — на зарядку аккумуляторов. Остальная вырабатываемая мощность расходовалась на собственные нужды установки. В их число входят затраты энергии на работу трех насосов, потери в двух теплообменниках, турбине и в генераторе электрической энергии.

Три насоса потребовались из следующего расчета: один — для подачи теплой воды из океана, второй — для подкачки холодной воды с глубины около 700 м, третий — для перекачки вторичной рабочей жидкости внутри самой системы, т. е. из конденсатора в испаритель. В качестве вторичной рабочей жидкости применяется аммиак.

Установка мини-ОТЕС смонтирована на барже. Под ее днищем помещен длинный трубопровод для забора холодной воды. Трубопроводом служит полиэтиленовая труба длиной 700 м с внутренним диаметром 50 см. Труба сваривалась на берегу из 58 секций. Выбор полиэтилена связан с тем, что он как будто не подвержен обрастанию и, следовательно коррозии (создание 700-метрового трубопровода было самым трудным делом). Трубопровод прикреплен к днищу судна с помощью особого затвора, позволяющего в случае необходимости его быстрое отсоединение. Полиэтиленовая труба одновременно используется и для закоривания системы труба—судно. Оригинальность подобного решения не вызывает сомнений, поскольку якорные постановки для разрабатываемых ныне более мощных систем ОТЕС являются весьма серьезной проблемой.

Впервые в истории техники установка мини-ОТЕС смогла отдать во внешнюю нагрузку полезную мощность, одновременно покрыв и собственные нужды. Опыт, полученный при эксплуатации мини-ОТЕС, позволил быстро построить более мощную теплоэнергетическую установку ОТЕС-1 и приступить к проектированию еще более мощных систем подобного типа.

ОТЕС-1 — плавучая лаборатория: как и мини-ОТЕС, она не предназначена для коммерческой выработки электрической энергии, хотя ее мощность достигает 1 МВт, т. е. в 20 раз больше, чем у мини-ОТЕС. В качестве вторичного рабочего тела в ОТЕС-1 также применяется аммиак. Питательный насос забирает воду из поверхностного слоя океана с температурой 27 °С и прогоняет ее через нагреватель аммиака, состоящий из 6304 титановых трубок диаметром 2 см. Это — паровой котел установки. Аммиак распыляется в теплых трубках и вскипает. Пар аммиака идет в турбину и вращает ее, а оттуда, совершив работу, поступает в конденсатор — холодильник. Конденсатор также сделан из тонких трубок, охлаждаемых водой с температурой немного более 4 °С. Там пары аммиака конденсируются и превращаются снова в жидкость, перекачиваемую обратно в испаритель. Общая длина трубок в двух теплообменниках (испарителе и конденсаторе) составляет 140 км.

Под установку ОТЕС-1 переоборудован танкер с турбоэлектрическим приводом. Электрическая силовая установка танкера позволяет с удобством использовать ее энергетические ресурсы во время проведения различных

экспериментов для привода насосов и других целей. На этой установке предполагается проверить некоторые эксплуатационные характеристики ОТЕС, чтобы в дальнейшем их можно было использовать при создании опытного образца. Число вопросов, подлежащих изучению, достаточно велико. К ним относятся, например, следующие. Какого типа теплообменники будут оптимальными и из какого материала их следует делать? Титан — дорог, нельзя ли его заменить на алюминий или что-нибудь другое? Как быстро будут развиваться морские организмы-образатели в теплообменниках и в других частях системы и как с ними бороться? Как повлияют на состояние окружающей морской среды мощные установки такого типа? Как лучше выполнить трубопровод для подъема холодной воды?

Последний вопрос становится традиционным для конструкторов всех установок ОТЕС. Для ОТЕС-1 он был решен в пользу применения трех параллельных полиэтиленовых труб диаметром 1 м каждая, длиной по 900 м. Трубы были доставлены на Гавайские острова секциями длиной по 27 м и сварены на берегу. Потом все три трубы были связаны вместе и уложены на тележки, установленные на специальном рельсовом пути, спускающемся прямо в океан. Суммарная масса трубопровода достигла 450 т, укладка его на тележки была выполнена с помощью лебедки. Для закрепления нижнего конца трубопровода вблизи дна потребовалось 50 т балласта. А для поддержания трубопровода в вертикальном положении его верхний конец окружен плавучим кольцом, имеющим буй, к которому прикреплен прочный конец; с его помощью трубопровод можно несколько перемещать. Такой способ крепления верхнего конца трубы к днищу судна позволил очень быстро (за 2 часа) произвести постановку трубы в океане. Так же просто происходит и разъединение трубопровода холодной воды с судном, если возникает сильное волнение или по какой-либо другой причине.

Конструкторы установки ОТЕС-1 ввели между трубопроводом холодной воды и судном новую деталь, которая сделала всю систему более надежной. Речь идет о карданном подвесе трубы к судну. При наличии кардана судно может произвольно качаться на волнах при относительно малоподвижном длинном трубопроводе, если волны не слишком велики (не более 2 м). А если волнение увеличивается, судно отцепляется от трубы и уходит в укрытие,

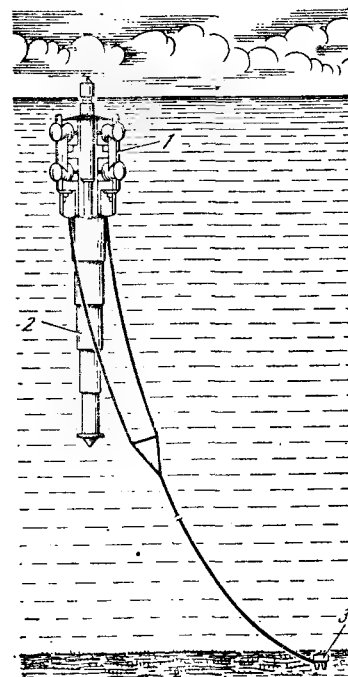
Рис. 29. Один из вариантов станции ОТЕС на мощность в сотни мегаватт

1 — платформа, 2 — труба холодной воды, 3 — якорная система

Защелка для быстрого разъединения судна с трубой была опробована еще в системе мини-ОТЕС.

Применением карданного подвеса трубы и защелки решился старый спор судна с трубой, начавшийся еще при Клоде. Надо сказать, что, видимо, труба все же «победит» судно, в том смысле, что новые станции ОТЕС на мощность во много десятков и сотен мегаватт проектируются без судна. Это — одна грандиозная труба, в верхней части которой находится круглый машинный зал, где размещены все необходимые устройства для преобразования энергии (рис. 29). Верхний конец трубопровода холодной воды расположится в океане на глубине 25—50 м. Машинный зал проектируется вокруг трубы на глубине около 100 м. Там будут установлены турбоагрегаты, работающие на парах аммиака, а также все остальное оборудование. Масса всего сооружения превышает 300 тыс. т. Труба-монстр, уходящая почти на километр в холодную глубину океана, а в ее верхней части что-то вроде маленького островка. И никакого судна, кроме, конечно, обычных судов, необходимых для обслуживания системы и для связи с берегом. Это любопытный эпизод из новейшей истории развития техники преобразования тепла океана.

На конец 1986 г. намечено окончание строительства новой, третьей по счету, экспериментальной станции ОТЕС, мощность которой будет находиться в пределах 40—100 МВт. При строительстве этой станции используется модульный принцип, она собирается из отдельных блоков по 10 МВт каждый. Такой подход позволит легко наращивать мощность до желательной величины в уста-



новленных пределах. Трубопровод холодной воды по-прежнему остается одним из наиболее сложных узлов этой станции. Станции мощностью в 40 МВт требуется трубопровод диаметром 10 м и длиной 900 м. А для проектируемой коммерческой станции ОТЕС на 400 МВт при той же длине трубопровод должен иметь диаметр 30 м. Каждую секунду насосы через него будут прокачивать около 1500 м³ холодной воды. Столько же требуется прокачать и теплой воды. Суммарный расход воды в этой мощной установке получится, как у реки Нил. — 2600 м³/с.

Полное водоизмещение корпуса станции на 400 МВт с заборной трубой оценивается цифрой около 500 тыс. т. Станция должна устанавливаться в районах океана с глубинами более 1200 м. Для ее удержания в районе постановки требуется якорная система с большой массой. В целом — поистине циклопическое сооружение, строительство его предполагалось начать в 1985 г. Было также сообщение о строительстве станции типа ОТЕС в Японии, но значительно менее мощной.

ТЕПЛО ИЗ ХОЛОДА

Энергию можно получать не только из теплых вод тропических или субтропических районов Мирового океана, но и из крайних северных или южных бассейнов планеты, т. е. из вод Арктики и Антарктики. Была бы только достаточная разность температур для эффективной работы тепловой машины. А разность там обычно есть, и иногда не меньше, чем в тропиках. Но не между слоями поверхностной и глубинной воды, как в тропиках.

Например, в Северном Ледовитом океане температура в поверхностном слое подо льдом близка к 0 °С. Ниже, на нескольких сотнях метров глубины, температура воды немного повышается и доходит примерно до 0,6 °С. Там находится теплый промежуточный слой, образовавшийся за счет притока вод атлантического происхождения. А глубже нескольких сот метров температура воды снова понижается до минус 1 °С. Самая холодная вода встречается в Датском проливе близ Гренландии, где температура ее падает до минус 2,2 °С; такая же холодная вода бывает и в море Уэддела в Антарктике. Где же при подобных условиях взять достаточно высокую разность температур в этих широтах планеты?

На помощь энергетикам приходит холодный воздух.

Во многих районах Арктики большую часть года температура воздуха ниже минус 10 °С. Например, на Новосибирских островах в году бывает всего 2—4 дня с температурой воздуха выше минус 10 °С, на побережье моря Лаптевых таких дней от 10 до 14, а на архипелаге Северная Земля их только 10—12. В остальное время года здесь царствуют морозы, временами значительно превышающие минус 10 °С.

На возможность использования энергетического потенциала высоких широт, по-видимому, первым обратил внимание в 1928 г. французский инженер Баржо. В качестве нагревателя им предлагалась морская вода с температурой, близкой к 0 °С. Холодильником должен был служить морозный воздух. В качестве вторичного рабочего тела было предложено взять такое вещество, которое кипело бы при температуре несколько ниже 0 °С и конденсировалось бы в жидкость при температуре минус 20 °С. Баржо рекомендовал углеводородные соединения типа пропана, бутана или изобутана. Для предотвращения потери рабочего вещества предлагался замкнутый цикл работы энергетической установки. Схема Баржо имеет много общего с идеей Д'Арсонваля. Но, учитывая арктические условия, Баржо предлагал вызывать кипение рабочего тела путем разбрызгивания в нагревателе морской воды, чтобы замерзая, она отдавала рабочему телу свою скрытую теплоту льдообразования. Это — остроумное предложение, но, как лучше реализовать его, до сих пор неизвестно.

Предложение Баржо не было практически реализовано. Пятьдесят лет назад указывались минимум две причины этого: малый КПД установки и практически неприемлемые размеры теплообменника (нагревателя) для получения достаточной мощности из-за низкой рабочей температуры нагревателя.

А недавно опубликована работа А. К. Ильина, где показана возможность практической реализации преобразования тепловой энергии океана в арктических районах³. В ней отмечается не только важность наличия достаточного градиента температуры, но также и необходимость достаточной скорости ветра и скорости течения воды в океане. Два последних условия, на которые

³ Ильин А. К. Особенности преобразования тепловой энергии океана в арктических районах. — В кн.: Преобразование тепловой энергии океана. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1984, с. 18—55.

раньше не обращалось должного внимания, необходимы для обеспечения нормальной работы теплообменников. Благоприятные условия для работы энергетических установок имеются в устье сибирских рек.

Допустимая максимальная степень охлаждения воды в арктических силовых установках определяется неравенством

$$T_{\text{ж}} - T_{\text{з}} = \Delta T \leq 2 \text{ К},$$

где $T_{\text{ж}}$ — температура морской воды, забираемой в нагреватель преобразователя; $T_{\text{з}}$ — температура замерзания морской воды при данной солености.

Физический смысл этого неравенства заключается в том, что морскую воду нельзя доводить до точки замерзания, как предлагал в свое время Баржо. Если она будет замерзать в теплообменнике, служащем нагревателем для вторичной рабочей жидкости, то образуется лед, который нарушит работу преобразователя.

По расчетам Ильина, КПД энергетической установки мощностью около 50 кВт в арктических условиях получается в пределах 0,79—2,08 %. Речь идет о КПД использования тепла воды, что же касается КПД самой установки, то он достаточно высок и достигает 43 %. Эта цифра относится к аммиачной установке мощностью 1 МВт. На основании детальных расчетов автор приходит к выводу, что в арктических районах океана зимой энергия, обусловленная разностью температур между морской водой подо льдом и атмосферным воздухом, может использоваться достаточно эффективно.

Имеется и другой путь использования тепловой энергии океана в высоких широтах. Речь идет о термоэлектрических преобразователях, на перспективность применения которых для этой цели указывал академик А. Ф. Иоффе еще в 1932 г. В наше время этот вопрос исследуется в Тихоокеанском океанологическом институте АН СССР. По расчетам, при разности температур 10 °С и разности глубин 100 м при использовании термоэлектрических преобразователей энергии с КПД 1 % с 1 км² поверхности океана можно получить электрическую мощность около 100 МВт. Необходимым условием является наличие течения со скоростью не менее 0,1 м/с. Отмечается, что «общая энергия Мирового океана, которую можно использовать подобным образом, превышает 10²⁰ Дж в год, т. е. сравнима

с энергией, получаемой от сжигания химического топлива на Земном шаре в течение года»⁴.

Использование новых источников энергии весьма важно для развития энергетики Крайнего Севера.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ЭЗФ

ЭЗФ — эффект запоминания формы — физическое явление, впервые обнаруженное советскими учеными — академиком Г. В. Курдюмовым и Л. Г. Хондросом в 1949 г. Эффект запоминания формы наблюдается в особых сплавах и заключается в том, что детали из них восстанавливают после деформации свою начальную форму при тепловом воздействии. Например, если пластинку из сплава нитинол согнуть в холодном состоянии в дугу, то она будет сохранять эту форму сколь угодно долго. Но достаточно согнутую пластинку немного подогреть — она тут же выпрямится, как хорошая пружина. При нагревании пластина из нитинола возвращается к своей первоначальной форме, которая была ей придана при изготовлении, точнее — при закалке (отжиге).

Широкую известность получил опыт с несматывающейся проволокой: тонкую длинную проволоку из нитинола нельзя свить в моток, она тут же разматывается. Когда изделие из нитинола возвращается к первоначальной форме, при этом развивается достаточно большое усилие: до 55 т на каждый квадратный дюйм сечения детали.

Можно сказать и так: эффект памяти формы заключается в способности особых сплавов накапливать под воздействием внешнего механического напряжения довольно значительную деформацию, обратимую при нагреве. В зависимости от типа сплава деформация может достигать 10—15 % и выше. Парадокс заключается в том, что при восстановлении первоначальной формы может совершаться работа, значительно превосходящая ту, которая была затрачена на деформацию в холодном состоянии. Однако парадокс этот кажущийся. Противоречия закону сохранения энергии здесь нет. Для восстановления первоначальной формы деталь необходимо подогреть, т. е. затратить некоторое количество тепловой энергии. И оно всегда будет больше произведенной работы. Если создать

⁴ Энергетические превращения в океане. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1981, с. 3.

тепловую машину, где в качестве рабочего тела будет применяться сплав, обладающий эффектом запоминания формы, то КПД такой машины, как и всякой другой, будет меньше единицы. По этому поводу физик Э. Раушер заметил, что в законах термодинамики нет никаких ошибок, просто они не объясняют того, что происходит в нити поле.

Физика эффекта запоминания формы основана на фазовых превращениях в особых сплавах. Мы говорили о нитиноле. Но есть и другие подобные сплавы, правда, нитинол — лучший из них. Он представляет собой соединение никеля с титаном, известное также под названием мононикелида титана. Его химическая формула $TiNi$. В этом соединении наиболее ярко проявляется способность запоминания формы, что непосредственно связано с особенностями изменения строения кристаллической решетки этого сплава при фазовых переходах.

Кристаллическая решетка нитинола может находиться в одной из двух форм: либо в виде объемно-центрированного куба (ОЦК), такое состояние решетки называется аустенитной формой; либо в виде ромбовидной структуры с центрированными гранями (РГЦ) — мартенситная форма. Переход объемно-центрированного куба в гранецентрированный ромб называется прямым мартенситным превращением, а переход структуры РГЦ в структуру ОЦК — обратным мартенситным превращением. На превращениях этих двух различных кристаллических структур и основано явление эффекта запоминания формы. Его называют также термоупругим мартенситным превращением, или переходом мартенсит — аустенит и обратно.

Схема фазовых превращений в нитиноле при изменении температуры представлена на рис. 30. График показывает количество мартенсита в нитиноле в зависимости от температуры. Проследим по этому графику за поведением пластинки из нитинола.

Пусть нитиноловая пластинка первоначально находится при температуре, обозначенной точкой M_n , которая соответствует температуре начала прямого мартенситного превращения. При дальнейшем охлаждении пластинки количество мартенсита будет возрастать до точки M_s , т. е. температуры конца прямого мартенситного превращения. Это самая холодная точка, здесь нитиноловая пластинка легко сгибается в дугу.

Дальше следует процесс нагрева, приводящий к обратному мартенситному превращению, т. е. к образованию

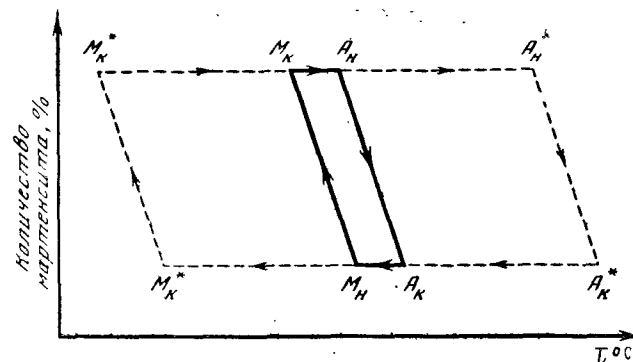


Рис. 30. Фазовая диаграмма сплава нитинол. Пунктиром обозначена фазовая диаграмма для сплава, не обладающего эффектом запоминания формы

аустенита. Начало этого процесса отмечено на диаграмме точкой A_n . По достижении пластинкой температуры, соответствующей этой точке, количество мартенсита в ней начинает резко падать. Процесс уменьшения количества мартенсита идет с повышением температуры по наклонной прямой $A_n — A_s$. На этом участке фазовой диаграммы происходит распрямление пластинки. Скорость выпрямления зависит от быстроты нагрева. Точка A_s соответствует температуре конца обратного мартенситного превращения.

Температура начала обратного мартенситного превращения (точка A_n) ниже температуры начала прямого мартенситного превращения (точка M_n) при охлаждении. Это важное обстоятельство связано с наличием деформации, т. е. изгибом пластинки. Накопленная в пластинке из нитинола энергия деформации за счет изгиба действует в том же направлении, что и нагрев. Поэтому обратное превращение начинается при более низкой температуре. Этому содействует упругая энергия в изогнутой пластинке, не проявлявшаяся до достижения пластинкой температуры, соответствующей точке A_n . В этом заключается существенная термодинамическая особенность сплавов с ЭЗФ.

Отметим еще одно важное отличие этих сплавов. Температурные интервалы $T = A_s — M_n$ или $A_n — M_s$, в которых происходит перестройка решетки у сплавов с ЭЗФ, значительно меньше, нежели у обычных сплавов, не обладающих памятью. Это обстоятельство имеет решающее значение

ние в рассматриваемом нами случае. Необходимость лишь в относительно малых изменениях температуры для обеспечения перестройки кристаллической решетки открывает широкие перспективы практического использования эффекта запоминания формы.

Явление ЭЗФ в наше время находит различные применения, в том числе для создания нового типа тепловых двигателей, способных работать от тепловых источников низкопотенциального типа. Если диапазон температуры фазовых превращений будет находиться в пределах температурного градиента, имеющегося в Мировом океане, то нитинол можно использовать в качестве твердого рабочего тела тепловой машины. Вместо аммиака или фреона — нитинол. Схема энергетической установки в этом случае полностью меняется. Применение нитинола открывает новый путь преобразования тепловой энергии океана.

Все известные ранее установки для преобразования тепловой энергии океана в механическую работу, а затем — в электрическую энергию основаны на применении турбин, приводимых в действие парами тех или иных жидкостей с низкой температурой кипения. Чтобы подобные системы были рентабельными, они должны иметь достаточно большую мощность. Капитальные затраты на их строительство весьма значительны, кроме того, они не свободны от недостатков, например — потери энергии в сетях распределения и обслуживания (до 10 %) и, как следствие, удорожание отпускной цены на электроэнергию (до 50 %). Такого рода соображения приводит изобретатель нитинолового теплового двигателя Р. Бэнкс в пользу маломощных преобразователей⁵ (дело в том, что в свое время он не видел конкретных путей создания мощных мегаваттных преобразователей, основанных на ЭЗФ).

Построенный Бэнком маломощный тепловой двигатель на нитиноле непрерывно устойчиво работал, сделав более $1,7 \cdot 10^7$ оборотов, и развивал мощность не менее 0,2 Вт, приводя во вращение генератор электрической энергии — от него горела электрическая лампочка.

Кинематическая схема двигателя Бэнкса представлена на рис. 31. Под действием энергии нитиноловых проволок в горизонтальной плоскости вращается колесо 9, являющееся маховиком и одновременно шкивом привода электри-

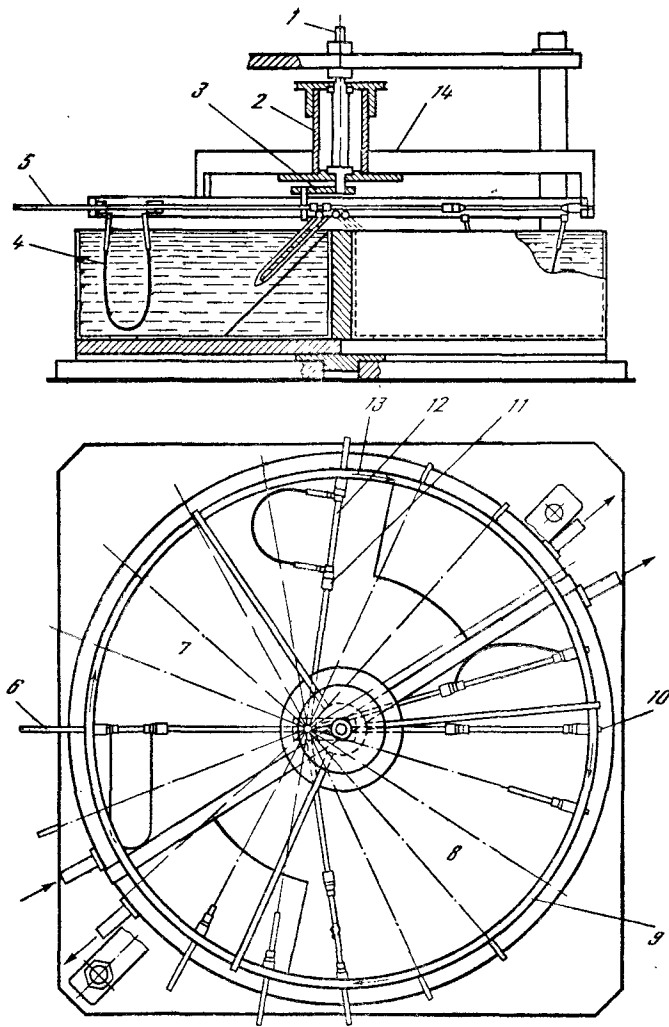


Рис. 31. Нитиноловый двигатель Бэнкса

1 — неподвижный вал, 2 — вращающийся вал, 3 — неподвижный кривошип, 4 — нитиноловая проволочная петля, 5 — движущий стержень, 6 — начало рабочего хода, 7 — горячая сторона, 8 — холодная сторона, 9 — движущееся колесо, 10 — конец рабочего хода, 11 — стопор движущего стержня, 12 — направление силы от действия проволочной петли из нитинола, 13 — компонента силы, вызывающая вращение, 14 — ступица движущегося колеса

⁵ Бэнкс Р. Тепловые двигатели из нитинола. — В кн.: Эффект памяти формы в сплавах. М.: Металлургия, 1979.

ческого генератора (последний на рисунке не показан). Колесо-маховик диаметром 350 мм имеет 20 стержней-спиц 5, на которых подвешены петли из нитиноловой проволоки диаметром 1,2 мм, длиной по 152 мм. Число нитиноловых петель равно числу стержней-спиц, т. е. их также 20 штук, на рисунке они все обозначены цифрой 4.

Нитиноловые проволоочные петли висят между ободом колеса 9 и втулками 11 на стержнях 5. Втулки способны перемещаться вдоль стержней под действием усилий, развиваемых нитиноловыми петлями. При вращении колеса вокруг неподвижного коленчатого вала 3 происходит увеличение или уменьшение расстояния между втулками и ободом колеса. Одновременно при вращении колеса изменяется положение нитиноловых петель относительно двух неподвижных полукруглых ванн с холодной и горячей водой, расположенных непосредственно под колесом 9. Температура воды в холодной ванне 24 °С, в горячей 48 °С, т. е. используемая разность температур составляет 24 °С.

Нитиноловая проволока (марки нитинол-55) для петель при закалке была прямой, поэтому при нагреве в горячей ванне петли стремятся распрямиться. Когда очередная петля погружается в ванну с горячей водой, она стремится разогнуться, при этом часть энергии каждой петли расходуется на раскручивание колеса 9. В «горячем» полупериоде расстояние между ободом колеса и втулками увеличивается в результате действия силы, распрямляющей петли. Поэтому на ободе колеса возникает вращающий момент относительно неподвижного вала 1. Он возникает благодаря тому, что центры вращения стержней-спиц 5 и колеса 9 разнесены между собой на 25 мм. Цифра эта соответствует расстоянию между осями неподвижного вала 1 и осью его кривошипа 3, т. е. высоте колена кривошипа. Стержни-спицы своими центральными концами связаны с шейкой кривошипа, поэтому, когда колесо вращается, они совершают возвратно-поступательные движения.

Стержни 5 действительно похожи на спицы, но их назначение не имеет ничего общего с обычным назначением спиц в колесе. Скорее, они выполняют роль шатунов в своеобразном кривошипно-шатунном механизме этого двигателя. Обод колеса 9 со всеми деталями поддерживается ступицей 14, сидящей на вращающемся пустотелом валу 2. Этот вал вращается вместе с колесом 9 вокруг неподвижного главного вала 1.

Длительные испытания этого двигателя не выявили никаких следов усталости у нитиноловых петель, более того, после нескольких сотен тысяч оборотов колесо стало вращаться быстрее. Восстановлению формы повторялось десятки миллионов раз. Такие результаты объясняются достаточно малой деформацией — порядка 0,5 %.

После работы двигателя в течение нескольких часов наблюдается развитие запоминания «холодной формы». Когда проволоочные петли из нитинола при вращении колеса погружались очередной раз в ванну с холодной водой, они сгибались самопроизвольно, без приложения усилий. Этот новый эффект назван двойной тренировкой, или двойной памятью. Эффект двойной памяти пока не получил достаточно удовлетворительного теоретического объяснения, но ясно, что он должен привести к увеличению чистой выходной мощности нитинолового двигателя.

Первый опыт по превращению солнечной энергии в электрическую с помощью нитинолового двигателя Бэнкс произвел в ноябре 1973 г.: вода для горячей ванны подогревалась солнечными лучами. С тех пор работы по исследованию нитинола и его применению сильно расширились и ведутся в лабораториях Великобритании, Швейцарии, Бельгии, ФРГ, Японии. В США создан Нитиноловый технологический центр. Проведена Международная конференция по нитиноловым тепловым двигателям, к 1981 г. было опубликовано 400 научных сообщений на эту тему, выданы патенты на более чем 100 нитиноловых установок, в том числе на 12 тепловых двигателей.

Некоторые исследователи считают, что нитиноловые двигатели смогут преобразовывать энергию более экономично, чем фотоэлектрические элементы. Д. Голдстейн, возглавляющий Нитиноловый технологический центр, полагает, что при работе нитинолового двигателя круглые сутки он сможет окупить себя за 18—24 месяца, после чего вырабатываемая им энергия будет «в некотором смысле бесплатной».

Сообщается о разработке новой марки нитинола, в которой фазовые переходы совершаются при температуре 9 °С. Такой градиент легко получить от солнечных коллекторов или источников геотермальных вод, что обеспечит работу нитиноловых двигателей для различных целей, в том числе для привода ирригационных насосов в районах, где нет централизованных сетей. Нитиноловые двигатели могут также использовать отработанное тепло, пре-

образуя его в полезную работу (в отработанное тепло уходит до двух третей всей энергии, потребляемой промышленными предприятиями). Изучается возможность создания ряда нитиноловых двигателей, рассчитанных на работу при постепенно понижающихся температурах горячей воды. Такой ряд двигателей может устанавливаться по потоку горячей воды, сбрасываемой промышленными предприятиями. При этом будет не только рекуперироваться часть энергии, но и предотвращаться тепловое загрязнение водоемов.

Создание ряда нитиноловых двигателей с постепенно понижающимся средним значением температуры рабочего интервала принципиально возможно путем изменения отношения в сплаве между никелем и титаном. Например, если сплав состоит из 55 % никеля и 45 % титана, то его фазовые переходы, т. е. способность восстанавливать форму, находятся в диапазоне комнатных температур. Но при небольшом увеличении содержания титана эффект запоминания формы в сплаве будет проявляться при температуре более 120 °С. Подбирая подходящее соотношение между содержанием никеля и титана, ученые надеются решить эту задачу.

Естественными источниками тепловой энергии для нитиноловых двигателей являются океаны, моря, озера и водохранилища. Оптимальный перепад температуры для нитиноловых двигателей близок к 20 °С, что соответствует градиенту, наблюдающемуся в океанах. Кстати, подобный градиент легко обеспечить и в искусственных условиях, например, в так называемых солнечных прудах. Речь идет о развивающемся способе аккумуляции солнечной энергии в прудах с подсоленной водой. В этом случае нитиноловые двигатели будут превращать запасенную тепловую энергию в механическую работу или электричество. Ближайшее будущее покажет, насколько успешно новые преобразователи смогут соревноваться с другими типами преобразователей тепловой энергии.

По оценке отдельных авторов, КПД нитиноловых двигателей⁶ может составлять 5—6 % (А. А. Гольштейн), теоретический же расчет по формуле, приведенной в ра-

боте С. М. Веймана⁷, дает КПД в интервале от 5 до 21 % в зависимости от свойств используемого материала. В настоящее время ведутся работы по сравнению экспериментально и теоретически полученных величин КПД.

Формула для КПД имеет вид:

$$\eta_n = \left\{ \frac{\ln(1 + \varepsilon)}{\varepsilon} \right\} \left(\frac{1}{T_0(0)} \right) \left(\frac{1}{1/\Delta T_0 + C_p/\Delta Q} \right),$$

где C_p — средняя удельная теплоемкость сплава; ΔQ — скрытая теплота фазового превращения; ε — восстанавливаемая часть деформации; T_0 — температура равновесия.

ТЕРМОВОДОРОДНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Несколько лет назад появилось сообщение о еще одном интересном проекте преобразователя. Ученые Йогогамского (Япония) университета разработали установку для получения водорода из морской воды, в которой источником энергии служит Солнце. Солнечные лучи фокусируются на спаях термоэлектрических элементов, температура горячих спаев достигает 200 °С. Температура спаев, охлажденных морской водой, падает до 30°. Образующийся электрический ток разлагает морскую воду на водород и кислород. Батарея термоэлементов (площадь около 10 м²) производит 10 тыс. м³ водорода в год, т. е. примерно 1 т/год. Как известно, водород — прекрасное топливо, при его горении не выделяется никаких вредных веществ.

Термоэлементы сделаны из висмута и теллура. Термоэлектрическая пара висмут—теллур отличается большой электродвижущей силой — около 500 мВ/°С. При разности температуры между горячим и холодным спаем 170 °С каждая такая термопара производит 80 мВ. Этого напряжения недостаточно для разложения воды. Для электролиза необходимо напряжение не ниже примерно 0,5 В. Учитывая падение напряжения в соединительных проводах и в воде, а также то, что в течение дня интенсивность солнечного излучения изменяется, вследствие чего будет изменяться и температура горячих спаев, необходимо иметь напряжение около 1 В или немного больше.

⁶ Golestaneh A. A. Comments on the thermal efficiency of an ideal Shape-Recovery cycle. — Scripta Metallurgica, 1980, vol. 14, p. 845—848.

⁷ См.: Вейман С. М. Деформация, механизм явления и другие характеристики сплавов с эффектом запоминания формы. В кн.: Эффект памяти формы в сплавах. М.: Металлургия, 1979.

Для этого потребуется соединить последовательно не менее 12 термопар.

Примем условно, что установка будет работать 300 дней в году по 8 часов в день. По закону Фарадея можно рассчитать, какой силы ток должен идти все это время через морскую воду. Расчет показывает, что для выработки тонны водорода батарея должна давать ток силой около 11 тыс. А. Это большой ток, но при низком напряжении — абсолютно безопасный. Для получения такого тока придется соединить параллельно несколько последовательных цепей. Если ограничить силу тока в каждой ветви 50 А, потребуется 220 параллельных цепей, в каждой из которых 12 термопар. Общее количество термоэлементов в установке будет 2640—3000 штук, они свободно разместятся на площади 10 м² — на каждую термопару придется примерно 30 см². Потребуется хорошее зеркало достаточного размера, в фокусе которого должны быть установлены световоды, подводящие энергию Солнца к спаям термобатарей.

УСТАНОВКА ОТЕС НА ОСТРОВЕ НАУРУ

Оригинальным примером использования энергии градиента температуры в океане служит энергетическая установка, построенная по проекту японских специалистов на острове Науру⁸. Осенью 1981 г. начала давать электрический ток опытная установка мощностью 100 кВт, обсуждается строительство коммерческой энергоцентрали ОТЕС на 2,5 тыс. кВт. Сравнительные характеристики обеих установок приведены ниже:

Показатели	Опытная установка	Коммерческая установка
Турбина		
температура паров, °C	24,8	25,0
расход паров, т/ч	74	1350
скорость вращения, об./мин	3000	750
Генератор		
выходная мощность, кВт	100	2500
напряжение, В	415	3300
частота, Гц	50	50
скорость вращения, об./мин	3000	750

⁸ См.: Mitsui T., Ito F., Seya Y., Nakamoto Y. Outline of the 100 kw OTEC pilot plant in the republic of Nauru. — IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, vol. PAS-102, N 9, p. 3167—3171.

Нагреватель

число секций	1	2
расход теплой воды, т/ч	1450 (29,8 °C)	13 500×2 (30 °C)
расход холодной воды в конденсаторе, т/ч	1410 (8,1 °C)	13 000×2 (6,3 °C)
Производительность насосов, м³/мин		
теплой морской воды	23,7	220×2
холодной морской воды	22,9	210×2
фреонового	1,0	9,1

В обеих установках используется осевая турбина компактного типа (рабочее тело — фреон) с давлением паров 10,6 кг/см² (абс.), нагреватели — с горизонтально расположенными трубами, конденсатор — с вертикальными трубами.

От всех других известных установок опытная установка на Науру отличается расположением на суше. Островное расположение имеет ряд очевидных преимуществ перед расположением на любом плавучем основании. Например, отсутствуют расходы на эксплуатацию судна-носителя, в том числе и на его периодические ремонты. Отпадает надобность в устройстве надежных якорных стоянок и дорогих приспособлений в виде защелки и карданного подвеса для трубопровода холодной воды. Не требуется специальный подводный силовой кабель для передачи электроэнергии на берег с особым устройством для его соединения с судном-носителем. Исключаются заботы о безопасности обслуживающего персонала, судна и всей установки в целом во время тропических ураганов. При расположении на острове океанская энергетическая установка приобретает надежность, свойственную энергоцентралям, стоящим на суше.

Отрицательная особенность островного расположения энергоцентрали ОТЕС заключается в неизбежном удлинении трубопровода холодной воды. Длинный трубопровод вызывает увеличение потерь мощности на подачу холодной воды. Очевидно, не всякий остров или атолл подходит для строительства океанской теплоцентрали: избранное место должно удовлетворять ряду необходимых физико-географических условий. По мнению японских специалистов, остров Науру является идеальным местом для установки ОТЕС.

Упрощенная схема опытной теплоэнергетической градиентной установки на острове Науру приведена на рис. 32.

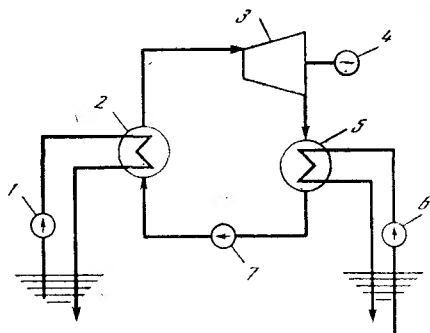


Рис. 32. Схема установки ОТЕС на острове Науру

1 — насос для подачи теплой поверхностной воды, 2 — испаритель, 3 — фреоновая турбина, 4 — генератор, 5 — конденсатор, 6 — насос холодной воды, 7 — насос для прокачки фреона

Она представляет собой типичную схему преобразователя с замкнутым циклом. В качестве рабочего тела используется фреон. Выбор фреона связан с его нетоксичностью (безвредностью). Фреон испаряется в нагревателе за счет тепла воды поверхностного слоя океана, каждый час испаряется 75 т фреона. Для испарения такого количества фреона через нагреватель прокачивается каждый час 1450 т теплой воды из поверхностного слоя океана. Вода поступает в нагреватель с температурой 29,8 °С, а выходит из испарителя при температуре 27,3 °С. Подача теплой воды в испаритель осуществляется с помощью насоса, двигатель которого потребляет 27,8 кВт.

Выходя из испарителя, газообразный фреон совершает работу в турбине, вал которой связан с генератором мощностью 100 кВт. Далее пары фреона поступают в холодильник, где конденсируются. С этой целью через конденсатор непрерывно прокачивается холодная глубинная вода в количестве 1450 т/ч. Холодная вода входит в конденсатор при температуре 8,1 °С, а выходит при температуре 10,6 °С. Для прокачки холодной воды имеется насос, потребляющий 43,3 кВт. Последняя цифра представляет собой существенную долю всей мощности, вырабатываемой установкой. Для обеспечения циркуляции фреона в замкнутой системе установки имеется еще третий насос, потребляющий 15,3 кВт.

Остров Науру находится в западной части Тихого океана близ экватора. В плане он имеет эллиптическую форму. Протяженность острова с востока на запад около 4 км, с севера на юг примерно 5 км, площадь 22 км². Остров представляет собой коралловый атолл. Максимальное возвышение острова над уровнем океана 65 м. Остров окружен полосой мелководья шириной от 50 до 100 м,

барьерного рифа вокруг острова нет. Сразу после полосы мелководья начинается крутой свал берегового склона, относительно быстро достигающий больших глубин. Это обстоятельство имело важное значение при выборе места строительства энергоцентрали ОТЕС.

Климат Науру — тропический, различаются дождливый и сухой сезоны. Температура воздуха в течение всего года колеблется в пределах от 27 °С до 32 °С днем, а ночью обычно не опускается ниже 25 °С.

Океан вокруг острова в основном спокойный, хотя случаются и штвалы (тайфуны). По этой причине во время наиболее ответственных работ по прокладке подводного трубопровода холодной воды пользовались информацией о погоде со спутников. С декабря по апрель бывает сильное волнение при западном ветре. Максимальная высота поверхностных волн достигает 4 м при периоде до 15 с по направлению $\pm 15^\circ$ относительно перпендикуляра к береговой линии. Этот период года (т. е. декабрь — апрель) был признан непригодным для проведения монтажных работ по укладке трубопровода холодной воды в океане.

На острове наблюдаются приливы. Максимальная высота приливных волн достигает 2,7 м. Они вызывают приливные течения на глубинах с максимальной скоростью до 0,92 м/с. Учитывались динамические воздействия на трубопровод холодной воды со стороны волн и подводных течений. На глубинах более 100 м в расчет принимались только подводные течения, вызванные приливными явлениями. Получение информации о скоростях подводных приливных течений потребовало проведения специальных измерений.

Для успешной работы установки ОТЕС основное значение имеет распределение температуры воды океана вблизи острова. Профиль температуры воды по глубине вблизи острова приведен на рис. 33. График показывает, что в верхнем перемешанном слое температура воды океана достигает 29,8 °С. На глубине 100 м наблюдается скачок, ниже которого температура воды медленно понижается, достигая 7 °С на глубине около 600 м и 6 °С — на глубине 700 м. С любого из этих двух горизонтов холодная вода подходит для обеспечения работы холодильника установки ОТЕС. Технологически приемлемой минимальной разностью температур считается 20 °С.

Забор холодной воды производится с глубины 580 м, для чего потребовалась труба длиной 945 м с учетом ее укладки по склону. Геологическое обследование подвод-

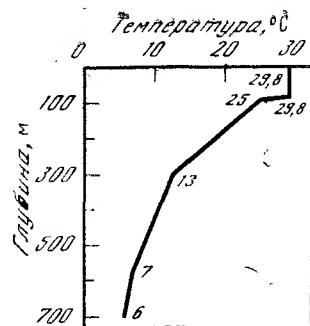


Рис. 33. Распределение температуры воды океана по глубине

это место сочли наилучшим для прокладки трубопровода холодной воды.

В качестве трубопровода холодной воды применяется труба из полиэтилена внутренним диаметром 700 мм. Толщина ее стенок составляет 35 мм до глубины 270 м, дальше — 30 мм до места забора. Выбор полиэтилена был сделан после ряда экспериментов, имевших целью уточнение поведения полиэтилена. К числу достоинств этого материала относится его гибкость. Полиэтиленовые трубы хорошо приспособляются к неровностям подводного склона, но полиэтилен подчиняется законам реологии, поэтому прочностные характеристики полиэтиленовой трубы зависят от окружающей температуры и длительности работы под нагрузкой. Чтобы получить достаточно полную физическую картину поведения такой трубы в сложных условиях нагрузки, перед прокладкой трубо-

ных склонов атолла показали, что по избранной трассе прокладки трубопровода холодной воды грунт достаточно твердый от уреза воды до глубины 1—2 м; глубже — пористый, но его несущая способность достаточно велика. Рельеф подводного склона — неправильный от края мелководья до глубины 50 м, далее склон понижается под углом, близким к 45°. Топография профиля берегового склона атолла в районе расположения установки показана на рис. 34;

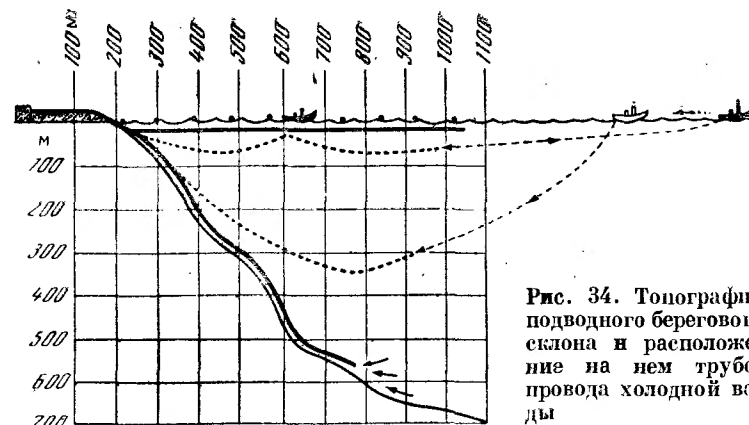


Рис. 34. Топография подводного берегового склона и расположение на нем трубопровода холодной воды

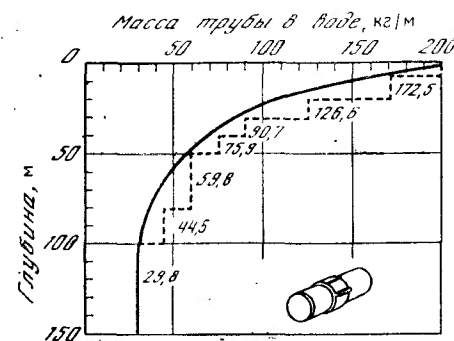


Рис. 35. Необходимый вес полиэтиленовой трубы на 1 м ее длины на разных глубинах

провода были проведены предварительные испытания, результаты которых приведены в таблице.

Эксперименты показали также, что радиус изгиба трубы должен быть в 80 раз больше, чем ее диаметр. Еще лучше, если радиус изгиба будет больше диаметра трубы в 120 раз, это обеспечит более длительную службу трубы.

Удельный вес полиэтилена меньше единицы, поэтому труба имеет положительную плавучесть. Чтобы обеспечить стабильность положения трубопровода на подводном склоне, был определен необходимый вес трубы в воде (рис. 35). С увеличением глубины океана вес падает вследствие уменьшения динамических влияний. Для увеличения веса трубы на нее были надеты стальные пояса, что обеспечивает сохранение стабильности положения трубопровода на склоне после укладки.

Изменение механических напряжений в полиэтиленовой трубе, кг/см²

Температура, °C	В начальный период			Спустя 1000 ч после окончания строительства			Спустя год после окончания строительства		
	растяжение	сжатие	срез	растяжение	сжатие	срез	растяжение	сжатие	срез
10	133	103	93	87	63	62	77	60	54
20	115	90	87	73	57	52	64	50	45
30	96	75	68	59	46	42	53	41	37

Перед укладкой был проведен модельный анализ поведения трубопровода во время укладки. Укладка была выполнена с помощью двух буксиров. Предварительно на берегу (на временном помосте) пять секций трубы длиной по 10 м каждая сваривались в одну плеть длиной 50 м. Всего было собрано 18 штук. Затем первая сваренная труба буксиром частично стаскивалась в море с наклонного помоста так, что один ее конец оставался на помосте. К нему приваривалась следующая труба. Процесс повторялся до тех пор, пока не достигалась нужная длина. Секции оставались на плаву с помощью вспомогательных буйков. Действие возмущающих сил в виде приливных волн и течений компенсировалось буксиром и лебедкой на берегу так, чтобы не повредить трубопровод. Когда весь трубопровод был на плаву, второй буксир ставился к середине трубопровода, чтобы облегчить поддержание его на плаву. Затем концы от вспомогательных буйев с противоположных концов одновременно обрезались. На рис. 34 пунктиром показаны две промежуточные стадии укладки, сплошными линиями — начальное (вверху) и конечное (внизу вдоль склона) положения трубопровода.

Результаты, полученные при эксплуатации опытной установки, превзошли ожидания проектировщиков. При номинальной нагрузке полная (валовая) мощность установки составила 100,5 кВт при отдаче «чистой» мощности в сеть 14,9 кВт. При испытаниях в режиме максимальной нагрузки полный выход составил 120 кВт, а отдача «чистой» мощности в сеть 31,5 кВт. Этот результат объясняют тем, что КПД фреоновой турбины и теплообменников оказались лучше предполагавшихся. Поэтому удалось уменьшить мощности питающих насосов, что привело к увеличению отдаваемой в сеть полезной мощности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Виды энергии Мирового океана

Основные направления развития океанской энергетики	3
Приливные волны	7
Ветровые волны и зыбь	11
Океан—аккумулятор энергии Солнца . . .	18
Энергия градиента солености	23

Глава II. Преобразование энергии ветровых волн и зыби

Классификация преобразователей . . .	28
Пьезоэлектрический преобразователь . .	36
Плита в качестве приемника энергии волны	41
Преобразователь с колеблющимися магнитами	46
Инерционные преобразователи качки . . .	56
Электрохимические преобразователи . .	65
Преобразователи Циолковского и Коккереля	71
Пневматические преобразователи	74
Гидравлические преобразователи	87
Гидрогенераторная установка А. Г. Баранова	93
Вибрационный и волновой насосы . . .	97
Инерционный преобразователь Айзекса . .	103
Расчет производительности инерционного насоса	104
Водородный преобразователь	108
Пламя над волнами	112
Петропомпа и тумбалены	119

Глава III. Преобразование тепловой энергии океана

Идея Д'Арсонваля и работы Клода . . .	122
Системы ОТЕС	128
Тепло из холода	132
Преобразователи на основе ЭЗФ	135
Термоводородный преобразователь . . .	143
Установка ОТЕС на острове Науру . . .	144